

CRISTINA TOSHIE MOTOHASHI MATSUSAKI

**MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE
DISTRIBUÍDOS E COLABORATIVOS DE
SISTEMAS PRODUTIVOS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em
Engenharia

São Paulo

2004

CRISTINA TOSHIE MOTOHASHI MATSUSAKI

**MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE
DISTRIBUÍDOS E COLABORATIVOS DE
SISTEMAS PRODUTIVOS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em
Engenharia

Programa:
Engenharia Mecânica

Área de concentração:
Engenharia de Controle e
Automação Mecânica –
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Diolino José dos
Santos Filho

São Paulo

2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Matsusaki, Cristina Toshie Motohashi
Modelagem de sistemas de controle colaborativos para
sistemas produtivos / C.T.M. Matsusaki. -- ed.rev. -- São Paulo,
2004.
154 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1.Sistemas produtivos 2.Sistemas de controle distribuídos
(Modelagem) 3.Sistemas a eventos discretos I.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos a todos que se envolveram no processo de desenvolvimento deste trabalho, em todas as dimensões.

Este trabalho, a tese, é apenas a ponta do iceberg, a parte material que simboliza o trabalho de formação iniciado a quinze anos atrás, em 1990 quando ingressei no programa de iniciação científica, integrando o grupo do Laboratório de Sistemas de Automação da Poli-Mecatrônica.

Omedeto e arigato são palavras de parabenização e de agradecimento em japonês. “Por que as pessoas dizem *omedeto*? Numa interpretação livre da sonoridade da palavra, entendo que é porque uma semente brotou (*me ga deru*). Toda semente que brota, encontrará dificuldades como intempéries ou pode até ser pisoteado. Mas sem brotar, não há crescimento, nem flores e nem frutos. Por ter conseguido transpor estas dificuldades, é que vem à tona a palavra de gratidão *Arigato*”. A conclusão deste trabalho marca o início de uma nova fase. Apesar dos longos anos de dedicação, encontro-me tomada por um espírito de iniciante, renovando os ideais acadêmicos, profissionais e os sonhos pessoais, e acima de tudo um imenso sentimento de gratidão.

Seria impossível agradecer nominalmente a cada um que se envolveu neste trabalho, seja direta ou indiretamente e até mesmo involuntariamente. As dimensões em que se realizou este trabalho fogem à especialidade técnica da engenharia e da formação profissional como pesquisador, atingindo todos os aspectos humanos.

Eterna gratidão e amor ao meu esposo Yoshimiti e aos meus filhos Leonardo e Letícia, pelo apoio e paciência em suportar a minha ausência em vários momentos nestes anos. Aos meus pais e meus sogros que cuidaram dos meus entes mais queridos. Às minhas cunhadas, cunhados, e sobrinhos. O mérito de conciliar estudo, família e trabalho deve-se totalmente ao grande esforço de minha família.

Ao orientador Prof. Dr. Diolino J. Santos Filho, que se multiplicou em tantos papéis desempenhados em nosso relacionamento, agradeço por ter me orientado persistentemente, depositando confiança incondicional em minha pessoa. Por ser amigo, principalmente nas horas de fragilidade, e sempre acreditando em mim. “Para quem crê, tudo é possível”.

Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi, obrigada por tudo que tem feito mostrando-me o caminho da sabedoria através da humildade, e também pela confiança depositada ao longo destes anos. Nesta oportunidade, agradeço também por ter me inspirado na carreira docente juntamente com o Prof. Hasegawa.

Os que acompanharam de perto no dia a dia do Departamento, e a quem devo minha gratidão, são muitos. Prof. Dr. Lucas Moscato, pelo apoio, sem o qual não seria viável a conclusão do trabalho. Prof. Dr. Newton Maruyama, pelas críticas sinceras e construtivas e momentos de reflexão. Prof. Dr. J. Reinaldo Silva, pelo apoio ao longo destes anos. Todos professores, funcionários e colegas pós-graduandos do Departamento. Todo o pessoal da seção de Pós-graduação e de Recursos humanos, em especial a Marli.

Os colegas do grupo de pesquisa, formado pelos orientados do Prof. Diolino, podem testemunhar que esta tese nunca foi escrita à duas mãos, mas sempre foi construída por múltiplas mãos que se apóiam. Preparando os slides da apresentação para a defesa,

vejo passar à minha frente todos os momentos que compartilhamos; vejo a cada tópico da apresentação, lembranças de um momento que juntos galgamos mais um degrau. Lindolpho Araújo, Osvaldo Asato, Francisco Nakamoto, André Cavalheiro, Gustavo Alves, Luciano Deluqui, Guy Amaral, Miguel Mena, Antonio Guardado, Fábio Guimarães. Gladys, Emília, Fabrício, Júlio e Arata, também, do grupo do Prof. Miyagi; os amigos Oscar e Takase.

Agradeço aos professores convidados, Prof. Dr. Ricardo Inamassu e Prof. Dr. Orides Morandin Jr., integrantes da banca examinadora constituída, além destes, pelo Prof. Miyagi, Prof. Maruyama e Prof. Diolino.

Quero agradecer e registrar as palavras do Prof. Inamassu: “O título (de doutor) é uma espécie de habilitação, para você conduzir agora em diante a sua pesquisa, orientar novos trabalhos...”. Sinto-me ainda bastante imatura em vários aspectos, os quais devo desenvolver continuamente, mas acolhida pela certeza de que sempre terei à minha frente a figura dos professores que me inspiraram, lanço-me à sua mesma carreira. “Das sementes dos frutos nascerão novos brotos, e a repetição deste ciclo é no que consiste o desenvolvimento da floresta.”

Por fim, agradeço àquele que colocou esta experiência de vida em meu destino, ou melhor, nos destinos de todos que nos encontramos, e que revelou caminhos muitas vezes árduos, permitindo evoluções inesperadas regidas por uma lei do universo que assemelhasse, em nossa percepção humana, ao amor parental.

RESUMO

O rápido avanço tecnológico nestes últimos anos, principalmente dos recursos computacionais e de comunicação, permite que os sistemas produtivos (SP) evoluam tanto no seu aspecto estrutural quanto no comportamental para que atendam às necessidades crescentes do mercado. Os elementos integrantes dos SP vêm incorporando estes avanços, atingindo maior autonomia e flexibilidade para cumprir suas funcionalidades.

Além disso, a tendência dos dispositivos de controle de incorporar a capacidade de atuação em ambientes distribuídos onde a interação ocorre através de redes de comunicação, verificada na evolução das normas aplicadas a sistemas de controle, reflete a necessidade de aderência dos sistemas de controle a essa realidade.

A necessidade de se manter competitivo no mercado impõe aos atuais SP situações em que emergem novos desafios para realização do controle dos seus processos globais, uma vez que estes assumem múltiplos objetivos, envolvendo diferentes naturezas de indeterminismo, assincronismo e variância no tempo, provocando um nível de complexidade inédito no que se refere ao controle destes sistemas.

Este trabalho propõe inicialmente uma nova abstração para modelar-se os SP baseada no conceito de decomposição multidimensional e em múltiplas faces, distribuindo o controle através dos componentes colaborativos. Feito isto, são propostos procedimentos e técnicas para modelagem de sistemas de controle distribuídos e colaborativos (SCDC) de SP. Considera-se para isso, primeiro, uma arquitetura lógica de controle que contemple os múltiplos domínios semânticos presentes em SP, que são provenientes das especificidades dos elementos integrantes. Segundo, a multiplicidade de habilidades necessárias para garantir a execução das estratégias de controle pertinentes a cada domínio. Terceiro, o fluxo de informações heterogêneas provenientes das interações colaborativas entre os domínios.

ABSTRACT

Recent technological advances, mainly of computer and communication systems, allow the production systems (SP) to evolve in structural aspect as well as in behavioral aspect. The SP resources have achieved enhanced autonomy and flexibility with embedded computer and communication capability.

Latest trends of control devices, as seen in the evolution of standards related to control systems, focus on the use of these devices in a distributed environment, where interaction occur through a communication network. Thus, the SP control system and its design methods have to fit to this reality.

In a competitive scenario, the SP are challenged to keep control of the global processes, considering the multiple goals of these processes and the involvement of different aspect of indeterminism, lack of synchronisms and time variance, generating a inedited complexity level for control of this systems.

This work proposes a new abstraction for modeling the control systems of SP, based on the concept of multidimensional decompositions. Based on this, it introduces the procedures and techniques for modeling the distributed and collaborative control systems (SCDC) of the production systems. First, it considers the logic architecture of the control that support many semantic domains presented in this type of SP. Then, the diversity of skills related to each domain necessary to accomplish the control strategies. And then, the heterogeneous information flow through the domains boundaries, derived from the collaborative interaction between the control components.

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
Resumo	v
Abstract	vi
Sumário	vii
Lista de Figuras	xi
Lista dos Principais Símbolos e Abreviações	xiv
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.3 Objetivo	3
1.3 Organização do Trabalho	4
Capítulo 2	
Sistemas Produtivos	7
2.1 Conceito de Sistemas Produtivos	8
2.2 Complexidade nos Sistemas Produtivos	12
2.3 Automação e Sistemas Produtivos	13
2.4 Revisão da Composição de Sistemas Produtivos	15
Capítulo 3	
Arquitetura Lógica de Controle em Sistemas de Controle Distribuídos e	
Colaborativos	18
3.1 Decomposição	19
A) Decomposição Semântica	20
B) Decomposição Funcional	21
C) Decomposição Temporal	22

D) Decomposição Espacial.....	22
3.2 Arquiteturas Lógicas de Controle.....	22
A) Arquitetura Centralizada	24
B) Arquiteturas Distribuídas.....	25
3.3 Arquitetura Proposta.....	29

Capítulo 4

Subsistemas do SCDC	34
4.1 E-MFG com elementos comunicadores	36
4.1.1 O E-MFG e a troca de sinais por Portas e Arcos de saída.....	36
4.1.2 Elementos Estruturais do E-MFG com Comunicadores	40
4.1.3 Interface de envio	41
4.1.4 Interface de recepção.....	43
4.1.5 Atividade de comunicação - Envio	45
4.1.6 Atividade de comunicação – Recepção.....	46
4.1.7 Dinâmica das regras de disparo.....	47
4.2 Controle de Processos	49
4.3 Controle de Transformação.....	50
4.4 Controle de Transporte.....	53
4.4.1 Regras Adicionais de Controle.....	54
4.4.2 Designação de Veículos Transportadores	62
4.5 Comportamento colaborativo.....	64

Capítulo 5

Uma Sistemática para modelagem de SCDC	68
5.1 Etapas do Desenvolvimento de SCDC.....	69
5.1.1 Etapa 1: Definição da arquitetura lógica.....	69
5.1.2 Etapa 2: Definição dos comportamentos internos de cada um dos sistemas de controle.....	70
A) Modelagem do controle de processos produtivos	70
B) Modelagem do controle de recursos de transformação	71
C) Modelagem do controle de recursos de transporte	72
5.1.3 Etapa 3: Definição do comportamento colaborativo.....	73

5.2 Processo de Desenvolvimento.....	74
Capítulo 6	
Exemplos de Aplicação	77
6.1 Caso 1	78
6.1.1 Descrição do Caso 1	78
6.1.2 Arquitetura Lógica de Controle.....	81
6.1.3 Modelagem do Controle de Processos	83
I. Identificação dos Processos Produtivos.....	83
II. Detalhamento dos Processos em PFS.....	84
III. Definição dos Atributos das Marcas no E-MFG	86
IV. Detalhamento das Atividades em E-MFG.....	87
V. Mapeamento das Mensagens de Comunicação	88
6.1.4 Modelagem do Controle de Recursos de Transformação.....	89
6.1.5 Modelagem do Controle de Recursos de Transporte.....	93
6.1.6 Modelagem do comportamento colaborativo	95
6.2 Caso 2	99
6.2.1 Descrição do Caso 2	99
6.2.2 Arquitetura de Controle.....	101
6.2.3 Modelagem do Controle de Fluxo Entre Unidades Produtivas	104
6.2.4 Comportamento Colaborativo	108
Capítulo 7	
Conclusões Finais	111
Anexo A	
Mark Flow Graph (MFG), Enhanced Mark Flow Graph (E-MFG) e Production Flow Schema (PFS).....	114
A.1 Fundamentos do Mark Flow Graph (MFG)	115
A.2 Mark Flow Graph Estendido (E-MFG)	117
A.2.1 Marcas Individuais	117
A.2.2 Marcas Individuais Compostas.....	118
A.2.3 Manipulação dos Atributos das Marcas.....	119
A.2.4 Dinâmica das Regras de Disparo.....	121

A.3 Production Flow Schema (PFS) e Seus Elementos	124
Anexo B	
Grafo de Alocação de Recursos (GAR)	126
B.1 Grafos de Alocação e Requisição de Recursos - GAR.....	127
Anexo C	
Designação de Veículos transportadores.....	133
C.1 Alocação e Distribuição de VT.....	133
C.2 Mapeamento dos Pontos Estratégicos	135
C.3 Algoritmo de Controle para Movimentação dos VT	141
Referências Bibliográficas	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Comportamento de um Sistema Produtivo caracterizado como Sistemas a Eventos Discretos.	9
Figura 2.2. Taxonomia de tipos de flexibilidade apresentada por Browne.....	10
Figura 2.3: Arquitetura básica de controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção. ...	11
Figura 3.1. Evolução das arquiteturas de controle.	24
Figura 3.2. Arquitetura de controle hierárquica.	26
Figura 3.3. Arquitetura de controle hierárquica-modificada.	27
Figura 3.4 Arquitetura de controle heterárquica.....	28
Figura: Esquema estrutural do SCDC	30
Figura 3.5. Exemplos de classes de controle.....	31
Figura 3.6. Esquema estrutural de SCDC do SP do caso de uso tratado neste trabalho.	32
Figura 3.7. Classes de controle do SP para o caso de uso tratado neste trabalho.....	33
Figura 4.1: Diagrama estrutural de um sistema de controle com rede de comunicação.	35
Figura 4.2. Exemplo de um grafo MFG, com representação do envio e recepção de sinais através de portas e arcos de sinal de saída.....	37
Figura 4.3 Grafos MFG conectados através de portas.	38
Figura 4.4. Grafo E-MFG de controle da utilização de recursos e grafos MFG de controle de processos produtivos. (figura retirada de (NAKAMOTO, 2002))	39
Figura 4.5. Interface de envio de mensagens do E-MFG.	42
Figura 4.6. Exemplo de interface de envio, com arcos de dados.	43
Figura 4.7. Interface de recepção de mensagens.	44
Figura 4.8. Exemplo de interface de recepção, com dois arcos receptores e um direcionador baseado em regras de produção.....	44
Figura 4.9. Exemplo de modelo E-MFG de uma atividade de envio.....	45
Figura 4.10. Exemplo de modelo E-MFG de uma atividade de recepção.....	46
Figura 4.11. Elementos de um GAR	55

Figura 4.12. (a) Exemplo de CFE e PAI no modelo GAR. (b) Parte do modelo E-MFG referente ao modelo (a).....	60
Figura 4.13. Fluxo de informações entre os domínios.	67
Figura 5.1 (a). Modelo PFS do processo de desenvolvimento de SCDC (nível 0).	75
Figura 5.1 (b). Modelo PFS do processo de desenvolvimento de SCDC (nível 1).	76
Figura 5.2 Detalhamento da Etapa 1 de definição da arquitetura.	76
Figura 6.1. Esquema do SP com seus elementos.	79
Figura 6.2. Classes de elementos do SP.	81
Figura 6.3. Classes de Sistemas de Controle do SCDC.	82
Figura 6.4. Esquema estrutural do SCDC.	83
Figura 6.5 Modelo PFS dos processos produtivos.	84
Figura 6.6. Modelos detalhados em PFS dos processos produtivos.....	85
Figura 6.7 Definição dos atributos das marcas individuais.....	86
Figura 6.8 Modelo genérico da atividade “ <i>Requis.X</i> ”	87
Figura 6.9 Exemplo de modelo da atividade de processamento	87
Figura 6.10 Modelo genérico da atividade “ <i>Dispatch.X</i> ”	88
Figura 6.11 Mapeamento das mensagens de comunicação no controle de “ <i>Proc.Xn</i> ”	89
Figura 6.12. Modelo GAR global.....	90
Figura 6.13. Regras adicionais de controle.	90
Figura 6.14. Modelo E-MFG de controle de recursos de transformação.	91
Figura 6.15. Box receptor de mensagens de requisição de recursos.	92
Figura 6.16. Definição dos sinais dos arcos através do direcionador.....	93
Figura 6.17. Estações, suas posições e demandas por transporte.....	94
Figura 6.18. Regiões resultantes do particionamento.....	95
Figura 6.19. Diagrama de interação.	96
Figura 6.20. Diagrama de Seqüência.....	97
Figura 6.21. Diagrama de classes de informação.....	98
Figura 6.22. Esquema do SP do caso 2.	100
Figura 6.23a. Elementos do SP.	102
Figura 6.23b. Composição de uma unidade produtiva.....	102
Figura 6.24. Modelo estrutural do SCDC.....	103
Figura.6.25. Esquema estrutural do SCDC.	103

Figura 6.26. Modelos GAR das rotas de cada produto.	105
Figura 6.27. Modelo E-MFG global de ocupação das UPs.....	105
Figura 6.28. Modelo GAR global de ocupação das UPs.....	106
Figura 6.29. CFE1	106
Figura 6.30. CFE2	107
Figura 6.31. Modelo E-MFG com comunicadores do controle de fluxo entre UPs.....	108
Figura 6.32. Diagrama de seqüência, para o caso de requisição de veículo para transporte dentro de uma unidade produtiva.	109
Figura 6.33. Diagrama de seqüência, para o caso de requisição de veículo para transporte entre unidades produtivas.	110
Figura A.1. Elementos básicos do MFG.	115
Figura A.2. Exemplo de estrutura de uma marca individual.....	118
Figura A.3. Os boxes funcionais básicos e um exemplo de marca individual composta..	119
Figura A.4. Representação de um box controlador alterando o estado de uma marca individual.....	121
Figura A.5. Representação de um procedimento de filtragem seletiva.	121
Figura A.6. Alteração dos atributos das marcas decorrentes do disparo.....	123
Figura A.7. Elementos do PFS.	124
Figura A.8. Elemento atividade em rede L/T.....	125
Figura A.9. Elemento distribuidor em rede L/T.	125
Figura B.1. Pares alocação e requisição de um mesmo produto em uma determinada etapa de sua seqüência de produção	127
Figura B.2. Exemplo de modelo GAR de um processo produtivo.....	130
Figura C.1. Algoritmo de controle para alocar os VTs de acordo com as demandas de transporte.	142
Figura C.2. Algoritmo de controle para manter o volume de trabalho dos VTs uniforme.	143

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIações

Q	Conjunto de n produtos diferentes a serem processados
q	Identifica o produto
N	Conjunto dos números naturais
p_q	Seqüência de produção do produto q
L_q	Comprimento da seqüência de produção do produto q
$s_q(i)$	A i -ésima etapa da seqüência de produção do produto q
$s_q(0)$	Condição inicial para iniciar a seqüência de produção do produto q
$s_q(L_q + 1)$	Condição em que a seqüência de produção do produto q está concluída
r_q^*	Seqüência de recursos correspondente à seqüência de produção p_q do produto q
$r_q(j)$	Recurso utilizado na etapa $s_q(i)$
$Cr_q(j)$	Box capacidade que modela cada recurso $r_q(j)$
$Ps_q(i)$	Box do tipo simples que modela cada etapa $s_q(i)$ da seqüência de produção do produto q
N_D	Número total de situações de ‘deadlock’ possíveis
c	Box capacidade que representa o compensador em E-MFG
Cr_i	Box capacidade que representa as unidades do recurso r_i .
R	Conjunto de recursos
A	Conjunto de pares ordenados (R_i, R_j)
s_{ij}	Etapas de produção inscritas no arco de R_i para R_j
G	Matriz associada ao grafo GAR
SCDC	Sistemas de Controle Distribuídos e Colaborativos
SP	Sistemas Produtivos

VT	Veículos Transportadores
UP	Unidade Produtiva
GAR	Grafo de Alocação de Recursos
MFG	Mark Flow Graph
E-MFG	Mark Flow Graph Estendido
PFS	Production Flow Schema
CFE	Ciclo Fechado de Espera
PAI	Par Alocação de Intersecção

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico dos recursos computacionais nestes últimos anos pode ser observado através de sua intensa aplicação nas mais diversas áreas de interesse da sociedade. Quando esses recursos computacionais são incorporados aos SP passa-se a ter uma nova concepção do que são os SP. Os recursos computacionais podem estar presentes embarcados nos elementos componentes dos SP, provendo-lhes maior autonomia e flexibilidade. Este fato faz com que o problema de se controlar SP neste contexto tenha uma nova dimensão, onde torna-se necessário considerar a complexidade da dinâmica global.

Esta complexidade advém do fato de que atualmente os processos que são executados nesses SP passam a ser variáveis no tempo, de tal forma que para atender as necessidades do mercado as versões que se sucedem dentro deste processo tenham que ser mantidas por um determinado espaço de tempo. Isso faz com que se tenha uma variedade de processos simultâneos sendo oferecidos. E então passa-se a conviver com essa realidade para que o SP se mantenha competitivo.

1.1 Motivação

Ao longo dos últimos anos, o processo de automação vem sofrendo transformações que têm sido, fortemente, influenciadas pelo avanço da tecnologia e dos recursos computacionais. Com a evolução da eletrônica, os processadores têm incrementado a capacidade e velocidade de processamento, assim como as redes de comunicação também estão sendo aprimoradas no sentido de aumentar a velocidade da transmissão e o desempenho. Como consequência, os sistemas de controle têm sofrido modificações no sentido de distribuir as funções de controle em diversas unidades de processamento. Assim, a estratégia de controle que antes se situava de forma concentrada em um único processador, atualmente pode ser distribuída em diversos dispositivos de controle que compõem o sistema de controle do processo produtivo.

As necessidades dos SP, para que estes se mantenham competitivos, têm sofrido uma transformação de acordo com a evolução do mercado. Essas necessidades que inicialmente, num cenário de produção de grandes quantidades, restringiam-se à realização efetiva da seqüência de produção de um determinado item, passam a ganhar novas dimensões quando se considera a produção simultânea de uma variedade de itens diferentes. A execução de múltiplos processos simultâneos através da utilização compartilhada de recursos flexíveis resulta num processo global dos SP caracterizado por um elevado grau de complexidade emergente. Atualmente, os SP se deparam com a necessidade de executar processos que são variáveis no tempo, no sentido de que, para atender as necessidades do mercado que impõem ciclos de vida de produtos cada vez mais curtos, as versões que se sucedem do processo acabam tendo que se manter por um determinado espaço de tempo, ou seja, quando iniciado o processo produtivo de uma determinada versão, as demais versões devem ser mantidas ainda por um tempo. Isso faz

com que se tenha uma variedade de processos simultâneos sendo executados. Passa-se assim à realidade dos SP atuais em que, emergem novos desafios para o controle dos processos globais destes sistemas, uma vez que tais processos globais assumem características envolvendo diferentes naturezas de indeterminismo, assincronismo e variância no tempo, provocando um nível de complexidade inédito no que se refere ao controle destes sistemas.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um conjunto de procedimentos e técnicas necessárias para modelagem de sistemas de controle distribuídos e colaborativos (SCDC) de SP.

Para se atingir o objetivo, o trabalho é dirigido pelas seguintes metas:

- A. Obter os procedimentos para a definição da arquitetura lógica de controle, considerando-se os diferentes domínios semânticos;
- B. Obter os procedimentos e técnicas necessárias para a modelagem dos sistemas de controle, considerando-se a sua função específica e a necessidade de comunicação;
- C. Obter os procedimentos para modelagem do comportamento colaborativo.

Para se obter uma definição da arquitetura lógica de controle , inicialmente realiza-se uma releitura dos elementos componentes dos SP, a fim de se obter uma nova abstração para modelar-se os SP baseada no conceito de decomposição multidimensional, de maneira a determinar os domínios semânticos em que estão distribuídos os sistemas de controle.

Devido à multiplicidade de habilidades necessárias para garantir a execução das estratégias de controle pertinentes a cada domínio, torna-se necessário buscar abordagens adequadas aos domínios que forneçam metodologias e técnicas de modelagem das estratégias específicas de controle, tomando-se o cuidado de prover métodos e ferramentas para descrever as interfaces necessárias para a comunicação.

Uma vez que os sistemas de controle situam-se distribuídos pelos domínios semânticos, ocorrem interações através da comunicação por mensagens para o comportamento colaborativo, que deve ser modelado para que o SP evolua dinamicamente de acordo com o comportamento desejado. Buscam-se procedimentos para determinar e descrever o fluxo de informações que atravessam as fronteiras dos domínios, e procedimentos para se determinar e descrever a seqüência de mensagens que define a dinâmica de interação de forma colaborativa

1.3 Organização do Trabalho

Este primeiro capítulo apresenta a motivação de se investigar novas propostas para sistemas de controle de SP no contexto atual, definindo o objetivo e as metas a serem alcançadas, e apresenta a organização do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos para se compreender a classe de sistemas que é o objeto de estudo deste trabalho. São apresentados os conceitos e características de SP como a complexidade e a flexibilidade. Propõe-se uma visão da composição dos SP de forma a abranger aspectos de diferentes naturezas, que antes eram tratadas separadamente.

O Capítulo 3 apresenta a arquitetura lógica de controle proposta, frente ao desafio de se obter um sistema de controle que suporte as diferentes semânticas existentes nos SP, ou seja de sistemas de controle distribuídos e colaborativos.

No Capítulo 4, instanciando-se a arquitetura proposta para um caso onde são observados os domínios comumente estudados em sistemas de controle, apresentam-se os procedimentos de modelagem das estratégias de controle para os SCDC. Apresentam-se as adequações e extensões às técnicas e procedimentos de modelagem necessárias considerando-se o novo contexto no qual a interação entre os sistemas de controle ocorrem através da comunicação de mensagens. Ainda no Capítulo 4, apresenta-se o procedimento para definição do comportamento colaborativo, como uma parte importante na modelagem dos SCDC.

O Capítulo 5 apresenta o conjunto de procedimentos de definição da arquitetura lógica de controle, de modelagem das estratégias de controle e de modelagem do comportamento colaborativo, na forma de uma proposta de sistemática para modelagem de sistemas de controle colaborativos para SP. O processo de desenvolvimento é caracterizado como híbrido, iterativo e evolutivo.

No Capítulo 6 são apresentados dois exemplos de aplicação da sistemática de modelagem de SCDC, evidenciando as possibilidades da arquitetura de controle proposta.

O Capítulo 7 resume as principais contribuições deste trabalho.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS PRODUTIVOS

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários para se compreender os Sistemas Produtivos, objeto de estudo deste trabalho. Para isto, inicia-se apresentado o conceito de Sistemas Produtivos, caracterizados neste trabalho como sistemas dirigidos por eventos discretos e segue-se destacando aspectos importantes como: características de complexidade e flexibilidade; e o comportamento regido a partir de regras definidas pelo homem. Por fim, realiza-se uma revisão da composição dos Sistemas Produtivos, abordando de forma integrada aspectos de diferentes naturezas.

2.1 Conceito de Sistemas Produtivos

Sistemas Produtivos (SP) são sistemas cuja finalidade é a produção de itens (HITOMI, 1990); (GROOVER, 2000); (MOREIRA, 2002). São exemplos de SP os sistemas industriais, sistemas de transporte, sistemas hospitalares, etc.

Este conceito de SP pode ser estendido a sistemas de prestação de serviços, entendendo-se que a prestação do serviço implica na alteração do estado do item que recebe o serviço (SANTOS FILHO, 2000); (MIYAGI ET AL., 2000); (GAITHER & FRAIZER, 2001).

Os processos produtivos em SP são constituídos por etapas, onde cada uma destas etapas pode ser interpretada como uma ação ou conjunto de ações que transformam o estado do item que está sofrendo o processo. Essencialmente, o objetivo de um SP pode ser entendido como a execução desses processos produtivos.

Considerar que os SP evoluem dinamicamente através da ocorrência de eventos classifica-os como Sistemas Dinâmicos Dirigidos por Eventos Discretos (SED) (HO, 1989); (CAO, 1989); (CASSANDRAS, 1993). SED são compostos estruturalmente por um conjunto de elementos independentes que, funcionalmente, comportam-se dirigidos por eventos, isto é, por ações que ocorrem durante um intervalo de tempo finito provocando uma transição de estado discreta no sistema. Estes sistemas podem apresentar características de paralelismo, assincronismo e conflito de processos, uma vez que não há necessariamente uma seqüência pré-determinada da ocorrência desses eventos em função

do tempo. O gráfico da Figura 2.1 representa o comportamento de SP quando visto como SED; no seu eixo horizontal tem-se a ocorrência de eventos, que é a variável independente.

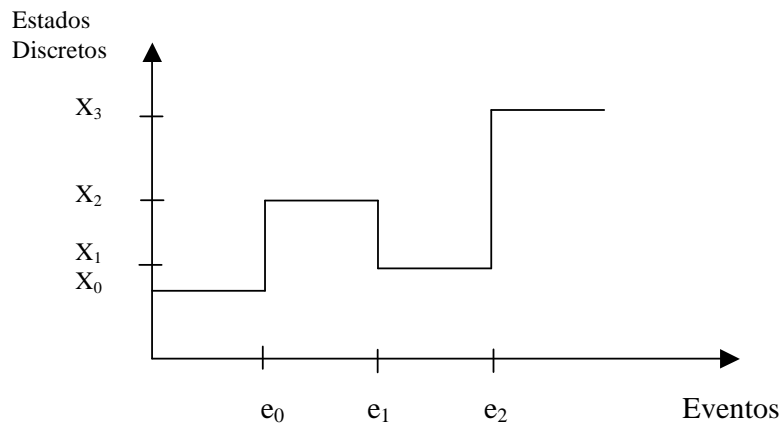


Figura 2.1 Comportamento de um Sistema Produtivo caracterizado como Sistemas a Eventos Discretos.

Assim, entende-se que os SP são compostos por um conjunto de recursos independentes, com finalidades específicas dentro do SP, de maneira que essas especificidades causam uma heterogeneidade de funcionalidades desses recursos.

Atualmente, devido à evolução tecnológica, os recursos também podem ser flexíveis, podendo realizar diferentes operações, tornando-se pertinente a análise do que vem a ser o conceito de flexibilidade no contexto de SP.

A flexibilidade de SP pode ser definida como sendo “a habilidade de mudar ou reagir com pouca perda de tempo, esforço, custo e desempenho”, citando Upton (1994) apud (BEACH ET AL., 2000) e pode ser classificada de diferentes formas. Uma possível taxonomia de tipos de flexibilidade apresentada por Browne et al. (1984) apud (BEACH ET AL., 2000) é mostrada na Figura 2.2.

Flexibilidade do recurso :	capacidade de um recurso de realizar diferentes tarefas
Flexibilidade do processo:	capacidade de produzir um item de diferentes maneiras
Flexibilidade de produto:	capacidade do SP modificar-se para produzir um novo conjunto de itens, de forma rápida e econômica
Flexibilidade de rota:	capacidade do SP lidar com quebra (de recursos) para continuar a produzir os itens
Flexibilidade de volume:	capacidade do SP produzir diferentes volumes de forma rentável
Flexibilidade de expansão:	capacidade do SP expandir-se de forma sistemática e modular
Flexibilidade de operação:	capacidade do SP reordenar as operações num processo produtivo de um item
Flexibilidade de produção:	universo previsto de tipos de itens que podem ser produzidos pelo SP

Figura 2.2. Taxonomia de tipos de flexibilidade adaptada de Browne et al. (1984).

Outro aspecto importante é que os SP podem ser classificados como “man-made systems” ou sistemas artificiais (ITO, 1991), isto é, uma classe de sistemas feitos pelo

homem, para atender às necessidades do homem. Em tais sistemas não se aplicam leis físicas invariantes para a determinação do seu comportamento dinâmico, uma vez que estes sistemas dependem de regras definidas pelo homem.

Esta característica enfatiza a importância do elemento humano como especialista capaz de interagir com os processos e atuar em situações que envolvem a tomada de decisões para o cumprimento das estratégias de controle. Baseado neste fato, é uma realidade a necessidade de se adotar uma abordagem antropocêntrica para o tratamento de SP (KOVÁCS, 1993); (KOVÁCS & MONIZ, 1995); (HIGGINS 1995).

A arquitetura básica de um Sistema Antropocêntrico de Produção (SAP) (SANTOS FILHO, 1998), mostrada na Figura 2.3, evidencia a integração do elemento humano como parte do sistema de controle. Nesta abordagem, parte do controle é estrategicamente atribuída ao elemento humano, que exerce esta função de forma inteligente baseando-se nas suas qualificações e experiências acumuladas.

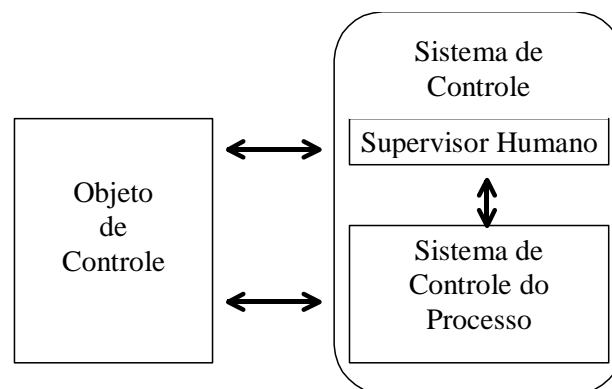


Figura 2.3: Arquitetura básica de controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção.

2.2 Complexidade nos Sistemas Produtivos

A utilização dos recursos flexíveis, decorrente da evolução tecnológica, permite que as exigências do mercado sejam atendidas através da produção simultânea de diversos tipos de itens, mas introduz dificuldades no projeto do sistema de controle. A execução de múltiplos processos simultâneos através do intenso compartilhamento dos recursos flexíveis torna o processo global do sistema um processo complexo (SANTOS FILHO, 1998) (SANTOS FILHO, 2000). Numa abordagem qualitativa da complexidade, isto é, sobre a relação entre o sistema como um todo e os seus componentes, que são elementos independentes, a complexidade é uma propriedade do modelo de um sistema, referente ao comportamento emergente de um sistema (EDMONDS, 1999).

O comportamento coletivo emergente não pode ser diretamente entendido pelo comportamento das partes quando observadas separadamente; no entanto, o comportamento coletivo está contido no comportamento individual quando são estudados no contexto em que se inserem (BAR-YAM, 1997). Assim, em SP flexíveis, mesmo que cada item esteja associado a um processo produtivo conhecido, não se pode prever o comportamento global do sistema que realiza múltiplos processos simultaneamente, até que estes processos (locais) sejam estudados em conjunto.

Portanto SP flexíveis podem ser caracterizados como sendo sistemas complexos, cuja complexidade provém de dois aspectos: o indeterminismo em relação ao instante das ocorrências dos eventos devido à natureza de seu comportamento dirigido por eventos, e o indeterminismo em relação à seqüência de ocorrência dos eventos devido à possibilidade de execução simultânea de múltiplos processos produtivos (SANTOS FILHO, 1998); (SANTOS FILHO, 2000).

2.3 Automação e Sistemas Produtivos

A organização dos SP depende diretamente do volume de produção e da variedade de processos que se pretende executar. Definidas as metas relacionadas a estes aspectos, obtém-se uma especificação inicial dos requisitos para a seleção da tecnologia de automação de processos mais adequada para a situação. Há uma afirmação de Masip (1988) apud (KÜNZLE, 1990) que orienta o procedimento básico para selecionar a tecnologia de automação que mais se adequa a cada caso: “Deve-se projetar um sistema produtivo tão rígido quanto seja possível e tão flexível quanto seja necessário.”

O conceito de automação relaciona-se à aplicação de tecnologia para o controle automático de processos dos SP, podendo ser classificado basicamente como fixa, programável ou flexível (SANTOS FILHO, 2000).

Se o controle é projetado considerando-se uma arquitetura dedicada para a solução do problema, tem-se a automação fixa. As situações em que a meta é realizar uma variedade de processos em lotes, exigem um determinado nível de flexibilidade das estações de trabalho. Nestes casos, há necessidade de flexibilidade de reprogramação dos recursos para processar diferentes lotes, correspondendo ao que é denominado automação programável. Caso haja necessidade de realizar simultaneamente o processamento dos diferentes lotes, torna-se necessário um sofisticado sistema de controle automático flexível, explorando os diversos níveis de flexibilidade apresentados. Tem-se assim a automação flexível.

Portanto, deve-se observar que o nível de flexibilidade operacional está diretamente relacionado ao nível de autonomia operacional de seus recursos. Os casos em que se pretendem volumes elevados de produção tendem a ser executados em sistemas de

produção mais específicos (ou dedicados), isto é, o objetivo a ser otimizado não é diversificação de processos e sim máxima taxa de produção. Por exemplo, no caso dos sistemas de manufatura automatizados, dependendo do volume de produção desejada, há a opção de se organizar a produção em linha, célula de manufatura, ou então, “job-shop”. A organização da produção em linha objetiva a produção em alta escala, não sendo necessário uma elevada flexibilidade operacional (em que, estações com alguma flexibilidade já são suficientes, constituindo-se em um exemplo de automação fixa).

Por sua vez, em uma situação intermediária em que o alvo é produzir volumes médios, é comum aplicar-se métodos para a classificação dos elementos a serem processados em famílias que possuem algumas propriedades que garantem um certo nível de homogeneidade em termos de similaridades que possam existir, considerando como referência os processos que devem ser realizados. Em manufatura automatizada, corresponde às organizações produtivas do tipo células de manufatura.

As arquiteturas do tipo “job-shop” são utilizadas para a produção de pequenos volumes e grande variedade de processos simultâneos. Nestes dois últimos modelos de organização, é comum implantar-se a automação flexível.

Portanto, observa-se que dependendo do tipo de serviço ou produto oferecido por SP, e dependendo da demanda, existe uma organização da produção adequada e por sua vez, um determinado grau de automação é exigido para garantir o nível de eficiência e qualidade desejadas.

2.4 Revisão da Composição de Sistemas Produtivos

Baseado no que foi exposto até o momento sobre os SP, observa-se que de uma forma genérica, estes são compostos por :

- Conjunto de recursos independentes: Os recursos de SP podem estar distribuídos em diferentes locais dependendo do arranjo físico dos SP; pode-se definir isto como sendo um aspecto relacionado à *distribuição espacial* dos recursos. Os recursos que realizam as atividades de transformação e outras atividades de suporte ao processo produtivo situam-se distribuídos geograficamente, caracterizando-se assim uma distribuição espacial. Esta distribuição espacial dos recursos depende da organização da produção, como explicada no item anterior. Por exemplo, sistemas de manufatura podem apresentar diferentes arranjos físicos (linear, celular, job-shop). Numa instância superior, os SP podem ser vistos como sendo formados por unidades produtivas que agregam os recursos de acordo com uma determinada organização lógica.
- Fluxo de processos independentes : Dependendo da configuração dos SP, diversos processos produtivos podem estar sendo executados concomitantemente e, desta forma, dependendo do nível de flexibilidade, estes processos podem se alterar, se transformar, ou adequarem-se frente à realidade dos SP ao longo do tempo, além dos processos sendo inicializados e finalizados em função do tempo, caracterizando a *distribuição temporal*. Neste contexto o processo global dos SP varia em função do tempo.

- Fluxo de informações heterogêneas: observando o fluxo global de informações nos SP, nota-se a existência de domínios de informações que de fato compõem este fluxo ordinário. Faz-se necessário uma classificação, distinguindo as categorias ou classes de informação que contemplam este fluxo e que estão de acordo com a estrutura de controle de SP, levando à necessidade de se observar a *distribuição semântica* destes sistemas.
- Conjunto de habilidades intrínsecas: observando a necessidade de se considerar quais são os requisitos em termos de técnicas e ferramentas necessárias para garantir a execução das estratégias de controle pertinentes a cada domínio, nota-se uma diversidade de habilidades, caracterizando uma *distribuição funcional*.

A consideração de todos os aspectos relacionados a SP expostos até o momento indica as seguintes necessidades dos sistemas de controle:

- Capacidade de atender as diferentes semânticas presentes no SP;
- Capacidade de tratar a complexidade do processo global.

A existência de domínios com semânticas específicas, cada qual refletindo as especificidades funcionais dos elementos dos SP, remete à necessidade de se ter sistemas de controle específicos para cada domínio. Portanto o sistema de controle de SP como um todo é formado por um conjunto heterogêneo de sistemas de controle distribuídos nos domínios identificados nos SP. Os sistemas de controle inter-relacionam-se através de comunicação baseada na troca de mensagens e o comportamento conjunto deve ser determinado de tal maneira que as ações conjuntas dos diversos sistemas de controle

colaborem para o comportamento desejado dos SP, ou seja, que seja um comportamento colaborativo.

CAPÍTULO 3

ARQUITETURA LÓGICA DE CONTROLE EM SISTEMAS DE CONTROLE DISTRIBUÍDOS E COLABORATIVOS

As necessidades do sistema de controle, baseadas nas características dos SP atuais, apontam para realidade de se ter sistemas de controle distribuídos e colaborativos. Este capítulo apresenta a proposta de uma arquitetura lógica de controle baseada em sistemas de controle colaborativos. Inicialmente são explicadas as múltiplas faces da decomposição do controle para se obter os domínios semânticos em que se distribuem os sistemas de controle. Em seguida, justifica-se a organização destes através da evolução das arquiteturas de controle. Finalmente, a arquitetura lógica proposta é instanciada para um caso onde são observados os domínios comumente estudados em sistemas de controle de SP.

3.1 Decomposição

As áreas de aplicação de agentes e sistemas multiagentes (JENNINGS; WOOLDRIGE, 1995); (PARUNAK 2000) são diversificadas, envolvendo sistemas de controle de SP, sistemas de comunicação, sistemas de transporte e, notadamente, sistemas industriais (SHEN & NORRIE, 1999); (PARUNAK ET AL., 1998); (KOLLINGBAUM, 2000); (JARVIS ET AL., 2003); (FLETCHER & BRUSEY, 2003).

Um estudo a respeito do uso de sistemas multiagentes mostra que estes são adequados em aplicações que apresentam algumas das seguintes características (WEISS, 2000):

- a) Presença de distribuição inerente: É o caso onde o conceito de distribuição existe no sentido de que a informação e os dados a serem processados:
 - ocorrem em diferentes locais geográficos - *distribuição espacial*;
 - ocorrem em diferentes tempos - *distribuição temporal*;
 - estão estruturados em “clusters”, cujo acesso e uso requerem familiaridade com diferentes ontologias e linguagens - *distribuição semântica*;
 - estão estruturados em “clusters”, cujo acesso e uso requerem diferentes habilidades de percepção, atuação e cognitivas - *distribuição funcional*;
- b) Presença de complexidade inerente : São complexos no sentido de que são relativamente grandes para serem resolvidos por um único software (centralizado) por causa das limitações tecnológicas de hardware ou software, portanto não possuindo uma solução trivial.

Desta mesma forma, observa-se uma identidade entre as aplicações de sistemas multiagentes e as características de SP. Portanto, os sistemas de controle dos SP devem estar organizados para interpretar e processar essa diversidade de significados da informação.

Desta necessidade surgem as *múltiplas faces* da decomposição do sistema de controle:

- Decomposição semântica;
- Decomposição funcional;
- Decomposição temporal;
- Decomposição espacial.

A) Decomposição Semântica

A decomposição semântica contempla os diferentes domínios de problemas existentes, focando na especificidade dos elementos de SP, que são os itens em produção e os tipos de recursos.

Todo elemento de SP tem atributos próprios e uma finalidade funcional específica dentro do sistema. Por exemplo: um veículo transportador tem determinado as suas características de dimensão, carga, capacidade e a finalidade de transportar itens entre unidades produtivas; um item tem a identificação do produto, o seu processo produtivo e deve sofrer transformação dentro do sistema.

Esses elementos podem ser classificados segundo sua finalidade funcional, resultando nas diferentes classes de elementos de SP, como por exemplo a classe de recurso de transporte, a classe de item de produção, a classe de recursos de transformação. Estas diferentes classes de elementos podem ser representadas utilizando-se técnicas orientadas a objetos, como por exemplo a UML (BOOCH ET AL., 1999). Assim, cada classe de elementos corresponde a um domínio específico de problemas. Concebendo-se um sistema de controle para cada domínio de problema, tem-se um conjunto heterogêneo de sistemas de controle, cada qual com sua especificidade.

É importante destacar que apesar de num dado contexto as classes de elementos de um determinado sistema produtivo serem finitas, este conjunto de classes pode vir a se modificar num novo contexto de evolução tecnológica onde se identificam novas classes de recursos com novas funcionalidades que antes não demandavam estratégias elaboradas de controle.

B) Decomposição Funcional

A decomposição funcional do sistema de controle de SP leva a classificação das funções de controle segundo as habilidades intrínsecas necessárias para a execução, de fato, das estratégias de controle situadas em cada domínio de problema. Por exemplo, os processos produtivos formados pelas suas atividades e suas relações de precedência podem ser descritas por técnicas de SED, como é o caso da metodologia PFS/MFG, proposta por Miyagi (1996), em que se foca o fluxo de itens nos processos produtivos para a modelagem do sistema.

C) Decomposição Temporal

A decomposição temporal contempla a variabilidade do processo global composto pelo conjunto de processos produtivos mais o conjunto de recursos dos SP. Assim, o sistema de controle deve permitir a geração de novos conjuntos de modelos de controle para atender a essas modificações. Para isso, os sistemas de controle devem possuir, além do próprio modelo de controle, mecanismos para gerar, executar e finalizar o modelo de controle, isto é, devem conter informação do meta-modelo dos modelos de controle.

D) Decomposição Espacial

A decomposição espacial tem foco na distribuição física dos recursos, preocupando-se com a aderência da especificação do sistema de controle à realidade dos recursos estarem fisicamente distribuídos. Esta aderência pode ser atendida adequando-se o desenvolvimento do sistema de controle com as normas atuais de padronização, como por exemplo a IEC61499 (2000).

3.2 Arquiteturas Lógicas de Controle

A arquitetura de um sistema é definida por (PELS ET AL., 1997) como sendo “um conjunto de especificações que representam as funções de seus componentes e suas interfaces”. A elaboração de uma arquitetura consiste, portanto, em especificar os componentes, suas interfaces, inter-relações e restrições. Tais especificações, que situam-se num nível alto de abstração, servem de base para as atividades das etapas subsequentes

do desenvolvimento do sistema (PELS ET AL., 1997). Para sistemas de controle de SP, arquiteturas (lógicas) podem ser definidas como um conjunto de especificações que representam as funções dos sistemas de controle e suas interfaces.

De uma forma concreta, uma arquitetura de controle tem como objetivo básico atribuir as funções de controle aos componentes específicos que fazem parte do controle. Assim, cada componente é definido por um conjunto de responsabilidades de controle que estão inter-relacionados a partir da definição de mecanismos para coordenação da execução das funções de controle no contexto global (DILTS, 1991).

A capacidade do sistema de realizar tomadas de decisões efetivas depende de como as responsabilidades das tomadas de decisões são divididas e coordenadas. Portanto, pode-se dizer que a arquitetura de controle determina a efetividade do sistema de controle, e outro aspecto fundamental e de extrema importância é que estabelecida a arquitetura, definem-se as limitações ou possibilidades de modificações futuras do sistema de controle (DILTS, 1991). Então observa-se a importância de se elaborar cuidadosamente a arquitetura lógica do sistema de controle de SP.

Considerando estas observações, para atingir os requisitos de produção, dentro do cenário atual de mercado competitivo, as arquiteturas de sistemas de controle de SP devem atender a requisitos de confiabilidade, extensibilidade e reconfigurabilidade de tal maneira que o atendimento a tais requisitos seja uma métrica adequada para análise das arquiteturas lógicas de controle.

Avanços tecnológicos em computação e comunicação possibilitam a concepção de uma variedade de arquiteturas de controle e sua implementação. A rápida evolução tecnológica associada à crescentes necessidades dos SP motivaram uma evolução nas

arquiteturas de controle, iniciando-se na arquitetura centralizada, passando para descentralizadas hierárquicas e as heterárquicas conforme ilustra a Figura 3.1.

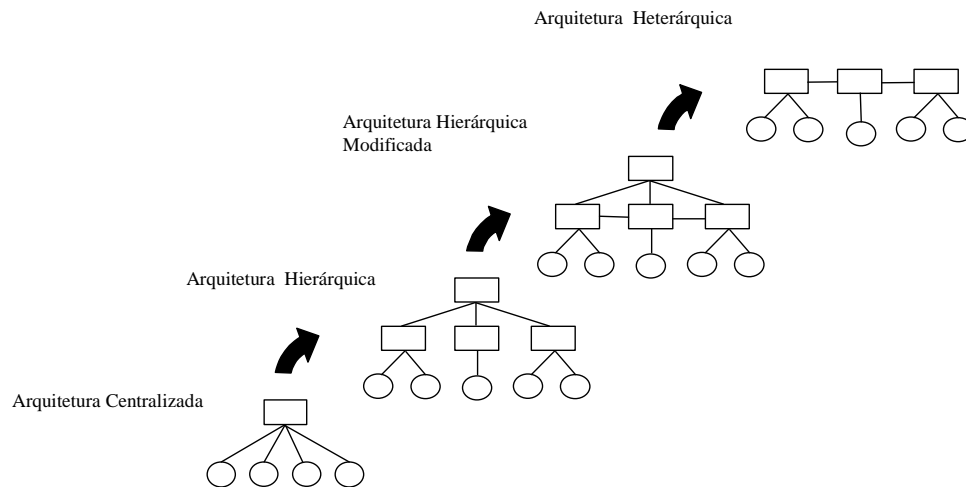


Figura 3.1. Evolução das arquiteturas de controle.

A) Arquitetura Centralizada

Numa arquitetura centralizada, toda a tomada de decisão está concentrada num único elemento de controle. Exemplos de controle centralizado podem ser encontrados no controle de uma célula de manufatura. Todas as tarefas organizacionais da célula, tais como escalonamento das tarefas, verificação de disponibilidade de ferramentas, monitoração das operações dos processos, controle e coordenação de entradas e saídas de material e ferramentas, seqüenciamento das operações, podem ficar sob a responsabilidade de um único controlador. Como desvantagens principais da arquitetura centralizada observam-se o tempo de resposta crescente de acordo com o porte do sistema e a

dificuldade em realizar-se modificações, limitadas pela capacidade de processamento da unidade de controle.

A flexibilização dos recursos dos SP, decorrente da evolução tecnológica, permite que as exigências de mercado de variedade de produtos sejam atendidas, através da produção simultânea de diversos tipos de itens. Este fato introduz dificuldades no projeto do sistema de controle, uma vez que a execução de múltiplos processos simultâneos através do intenso compartilhamento dos recursos flexíveis torna o processo global do sistema um processo complexo e então a abordagem centralizada torna-se impraticável (SANTOS FILHO, 2000).

Nesta situação, o comportamento global é complexo porque apresenta indeterminismo em relação ao tempo e em relação à seqüência de uso dos recursos compartilhados. Então, uso de modelos determinísticos na abordagem centralizada, isto é, modelos que requerem que todo o comportamento seja previamente determinado, torna-se impraticável devido à explosão combinatória de estados.

B) Arquiteturas Distribuídas

O avanço tecnológico dos dispositivos de realização de controle e das redes de comunicação e protocolos utilizados em SP viabilizam uma série de possibilidades em desenvolvimento de arquiteturas de controle, que evolui da centralizada para a descentralizada ou distribuída. Com o intuito de sanar algumas desvantagens do controle centralizado, surgiram os sistemas de controle de arquitetura hierárquica, bastante difundidos com a aplicação em sistemas CIM- Computer Integrated Manufacturing (CHING-YUEN ET AL., 1997).

Uma arquitetura de controle tipicamente hierárquica apresenta níveis de controle e contém vários módulos de controle dispostos em níveis, numa organização piramidal como ilustra a Figura 3.2. Todas as atividades do nível inferior são ditadas pelo nível superior, caracterizando uma relação “master-slave”. As interações entre os módulos limitam-se aos inter-relacionamentos verticais entre o módulo superior e os seus subordinados (DILTS, 1991).

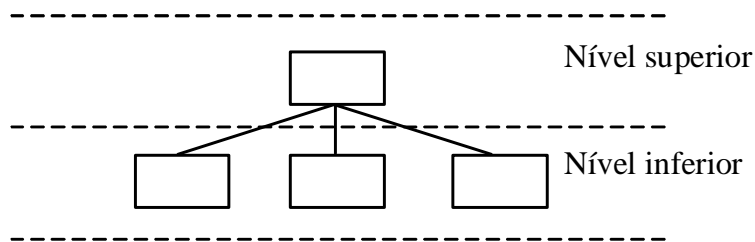


Figura 3.2. Arquitetura de controle hierárquica.

Uma segunda forma de arquitetura hierárquica, conhecida como hierárquica-modificada (DILTS, 1991) ou híbrida (LIU & ZHANG, 1998), herda da hierárquica a formação de níveis (Figura 3.3). A diferença entre os dois está principalmente no grau de autonomia dos subordinados, provida através do inter-relacionamento entre os elementos do mesmo nível. Um exemplo deste tipo de arquitetura é a arquitetura de controle *multi-nível/multi-camadas* aplicada a sistemas de manufatura, apresentada em (JONES & SALEH, 1990).

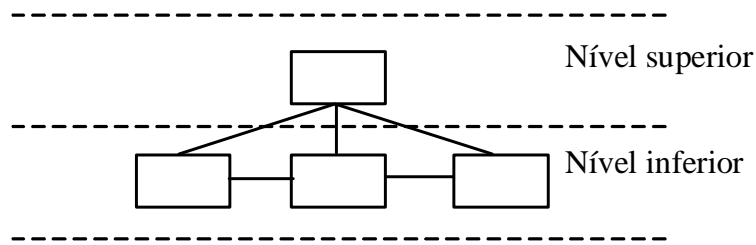


Figura 3.3. Arquitetura de controle hierárquica-modificada.

No controle hierárquico, uma modificação, como por exemplo, a introdução de um processo novo, ou algo que implica na adição de uma atividade (não prevista anteriormente), requer que o controle do nível superior seja revisto, e conseqüentemente, os níveis inferiores também sejam revistos provocando-se o conhecido efeito cascata. Portanto, a incorporação de novos processos (novos comportamentos) não é possível sem causar um grande impacto na estrutura proposta. Além disso, pode-se dizer que o controle superior herda as características do controle centralizado pois é o elemento centralizador de seus subordinados.

Os avanços na computação distribuída e das redes de comunicação permitiram que formas de controle constituídas por entidades autônomas distribuídas que se comunicam entre si, mas sem a relação de “master-slave” encontrada na forma hierárquica, fossem consideradas. Estas formas são exemplos de aplicação do conceito de controle heterárquico que se fundamentam na autonomia local e na abordagem cooperativa para tomadas de decisões globais. Não existem níveis de controle superiores e a cooperação entre as entidades é realizada através de negociação. A autonomia local implica em ter

bases de informação locais, reduzindo ou eliminando a informação global e centralizada (Figura 3.4).

Num contexto onde o controle de SP torna-se complexo, soluções de controle distribuído são estudadas com o intuito de obter sistemas em que as suas partes possam ser individualmente bem estruturadas, isto é, possam ter um grau de complexidade menor do que a do todo, partindo assim para a aplicação das técnicas de resolução distribuída de problemas provenientes da área de inteligência artificial distribuída (VAN BRUSSEL ET AL., 1998). No entanto, nessa abordagem de resolução distribuída utilizando-se uma arquitetura puramente heterárquica, a imprevisibilidade da convergência é uma limitação para aplicação em controle de SP (DILTS, 1991); (VAN BRUSSEL et al., 1998).

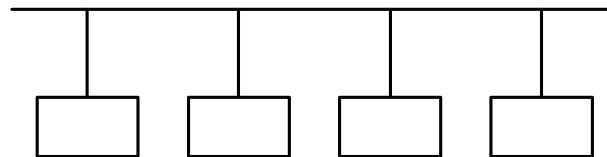


Figura 3.4 Arquitetura de controle heterárquica.

Estudos comparativos entre as arquiteturas de controle, indicam que arquiteturas que se situam num ponto intermediário entre as formas extremas de heterarquia e de hierarquia, como por exemplo as *hierarquias parciais dinâmicas* (BRENNAN, 2000), mostram-se mais promissoras para sistemas de controle de SP, pois podem preservar a estabilidade da hierarquia ao mesmo tempo em que provê a flexibilidade dinâmica das

heterarquias. Bongaerts et al. (2000) enfatiza a importância de se introduzir formas de hierarquia em sistemas de controle heterárquicos, para conciliar previsibilidade do comportamento, possibilidade de otimização e robustez a distúrbios; e então apresenta uma arquitetura formada por uma base heterárquica de controladores autônomos acrescido de um controlador central para coordenar o comportamento dos controladores locais.

3.3 Arquitetura Proposta

Observando que os elementos de SP são classificados pela sua especificidade, de acordo com a distribuição semântica associada aos domínios de informações presentes no fluxo de informações heterogêneas, o controle do comportamento dos elementos de uma determinada classe tem a semântica específica dessa classe de elementos. Assim, pode-se dizer que cada semântica determina uma classe de sistemas de controle, pertinente ao domínio de problemas da respectiva classe de elementos. Por exemplo:

- O controle para não travar o fluxo de itens nos recursos de transformação pertence à classe de controle de recursos de transformação, pois está no domínio de problemas de controle da classe de recursos de transformação;
- O controle para não travar o fluxo de itens através das unidades produtivas é percebido como sendo um problema de transporte entre as unidades produtivas, portanto pertencente à classe de controle de recursos de transporte.

Nos SP onde existem diferentes semânticas, devem existir diferentes sistemas de controle, cada qual com a sua especificidade ou responsabilidade, compondo um sistema

heterogêneo. Cada um desses sistemas de controle trata de um problema, que são de naturezas diferentes e que requerem técnicas de modelagem, análise e controle específicas para o domínio do problema. A colaboração desses vários sistemas de controle leva ao comportamento desejado para os SP.

A Figura 3.5(a) apresenta uma situação cujo esquema baseia-se na arquitetura de controle proposta. As áreas tracejadas representam a decomposição por semânticas diferentes. As elipses representam os controles, organizados numa arquitetura hierárquica modificada. No nível inferior situam-se os controles de processos de produção ou processos locais, e no nível superior situam-se os controles de processos de recursos, que são processos globais. A comunicação horizontal dentro do nível superior gera o comportamento colaborativo entre os controladores de recursos.

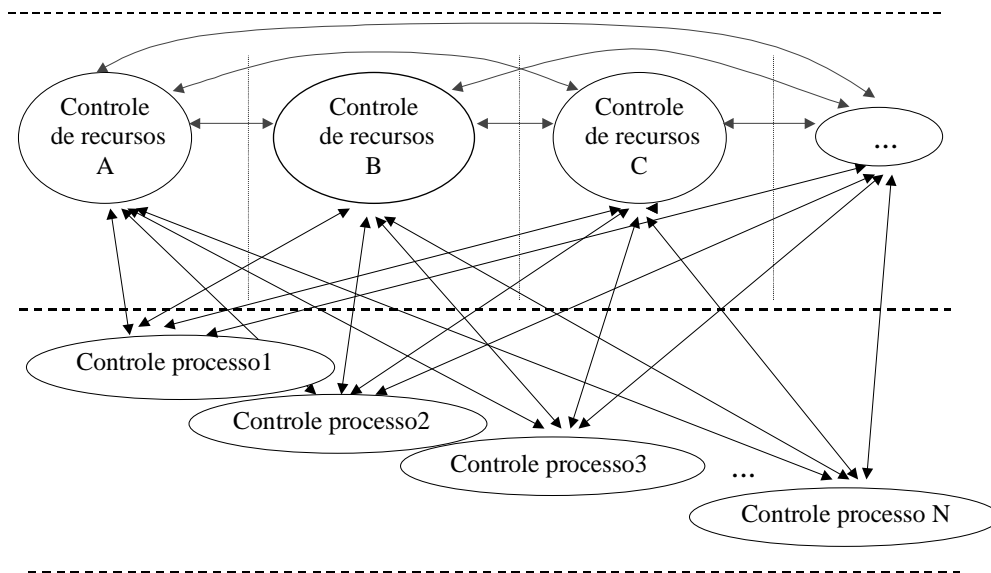


Figura 3.5(a). Esquema estrutural do SCDC

A Figura 3.5(b) exemplifica as possíveis classes de controle, num diagrama de classes da UML (BOOCH ET AL. 1999).

Observa-se que a arquitetura proposta é aberta no sentido de permitir a inserção de novas semânticas, decorrente, por exemplo, da evolução tecnológica dos elementos dos SP e então da necessidade de estabelecer um novo sistema de controle para atuar sobre o comportamento desses elementos acrescentando-se assim novas classes de sistemas de controle nesse modelo estrutural do SCDC.

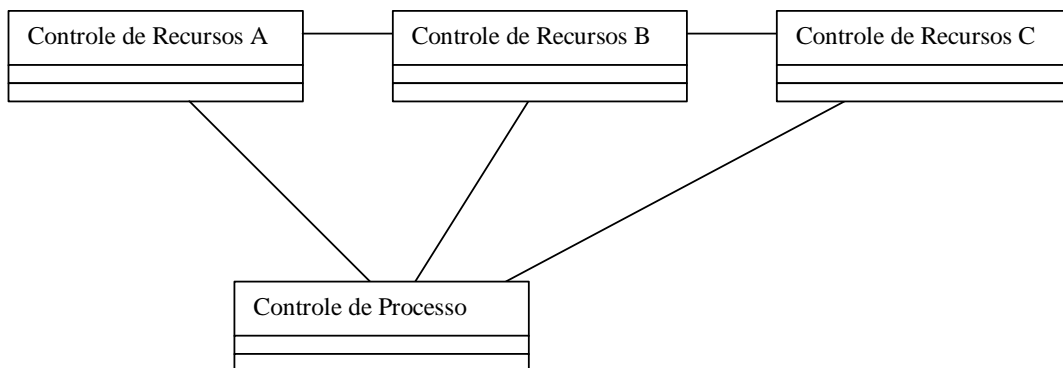


Figura 3.5(b). Exemplos de classes de controle.

Durante o desenvolvimento do sistema de controle de SP é preciso definir-se as funções que se pretende atribuir ao dispositivo de controle. Estas funções de controle podem ser classificadas, traçando-se um paralelo à classificação de tipos de intertravamentos para o controle de SED (MIYAGI, 1996) em: funções de inicialização, funções de operação, funções de diferentes modos de operação, funções de manutenção,

funções de detecção e recuperação de erros, funções de tratamento de exceções, funções de término, entre outras. Pode-se compreender que estas funções de controle estão presentes em todos os sistemas de controle constituindo o que poderia ser denominado de conjunto de meta-regras de controle dos sistemas de controle de SP.

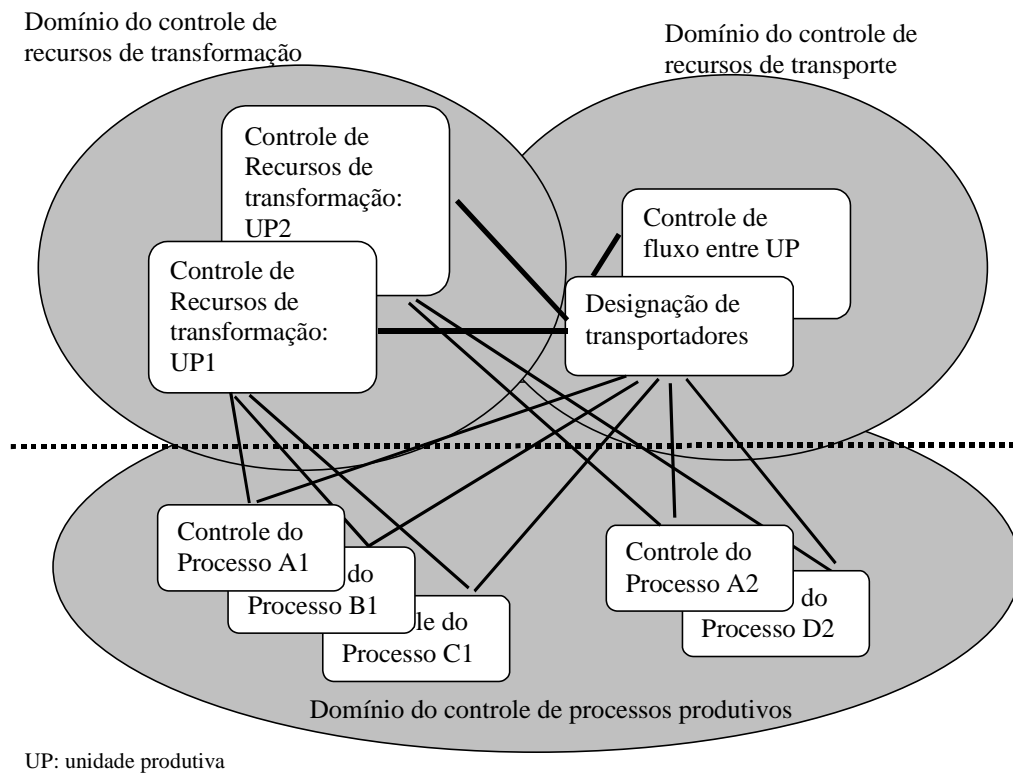


Figura 3.6. Esquema estrutural de um exemplo de SCDC de sistemas de manufatura flexível.

A Figura 3.6 representa um exemplo de possíveis sistemas de controle que compõem um SCDC, que pode ser observado atualmente em SP, em especial nos estudos

sobre controle de sistemas de manufatura flexível (INAMASU, 1995); (SANTOS FILHO, 1998); (SANTOS FILHO, 2000); (PARK ET AL., 2002). Tais SP são compostos por recursos flexíveis de transformação e por um sistema de transporte composto por transportadores que permitem flexibilidade de rota. São capazes de produzir uma diversidade de produtos simultaneamente, organizando os seus elementos em unidades produtivas responsáveis pela realização de um conjunto de processos produtivos que compartilham o seu uso. Adota-se neste trabalho SP desta classe como sendo um *caso de uso*¹, no qual se instancia a arquitetura de controle proposta.

A Figura 3.7 apresenta o diagrama de classes de controle para o caso em questão.

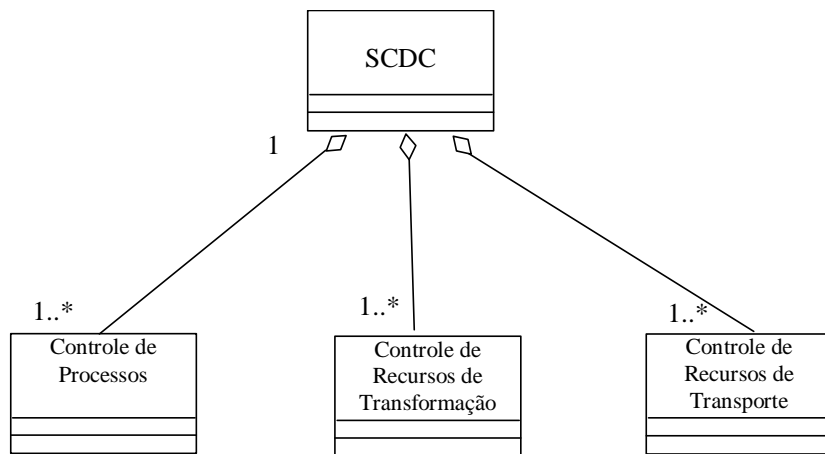


Figura 3.7. Classes de controle de SP correspondentes ao SCDC da Figura 3.6

¹ Entenda-se *caso de uso* como sendo um exemplo de aplicação típica.

Capítulo 4

SUBSISTEMAS DO SCDC

Para que os SP evoluam dinamicamente apresentando o comportamento desejado é preciso que as estratégias de controle de cada um dos sistemas de controle do SCDC sejam especificadas, ou seja, modeladas para que posteriormente possam ser implementadas, seja em controladores programáveis ou seja em outros tipos de dispositivos de realização do controle.

A arquitetura lógica de controle de SCDC, proposta no capítulo anterior, é formada por um conjunto heterogêneo de classes de sistemas de controle. Como as classes de controle provêm de diferentes domínios de problemas, naturalmente diferentes técnicas de modelagem serão necessárias para atender às semânticas de cada domínio.

Este pluralismo de técnicas de modelagem necessárias, traz dificuldades no desenvolvimento de SCDC. Cada classe de sistemas de controle deve ser abordada com técnicas próprias do respectivo domínio de problemas, considerando-se a sua semântica. No caso de uso que está sendo tratado neste trabalho, as classes de controle são: controle de processos, controle de transformação e controle de transporte.

No contexto onde a interação entre sistemas ocorre através de mensagens de comunicação, que contém informação e não mais uma simples troca de sinais de lógica binária, tornam-se necessárias novas abordagens e técnicas de modelagem das estratégias de controle².

A Figura 4.1 mostra a rede de comunicação como um novo elemento inserido no sistema de controle.

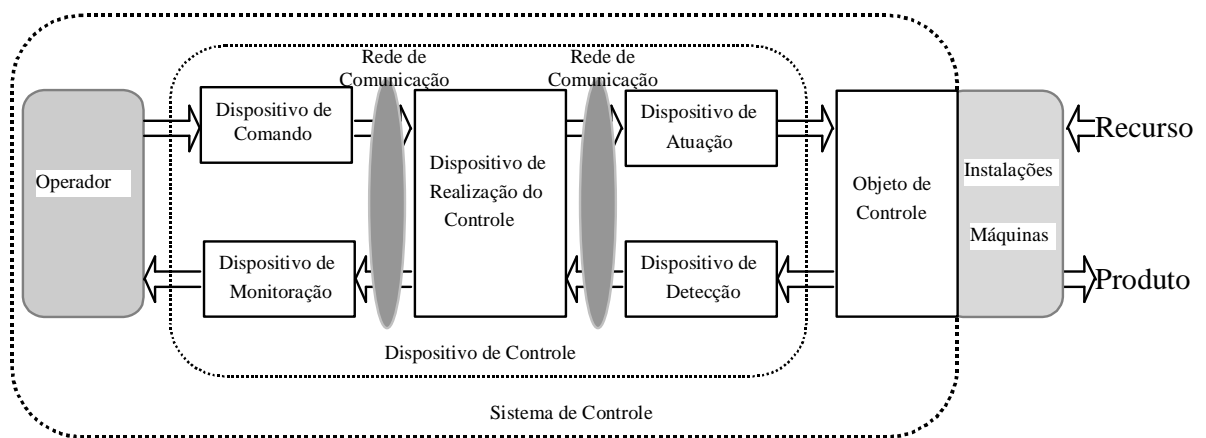


Figura 4.1: Diagrama estrutural de um sistema de controle com rede de comunicação.

Este capítulo tem como objetivo apresentar a proposta do E-MFG com elementos comunicadores, para a modelagem do controle no contexto de SCDC e em seguida apresentar a modelagem das estratégias de controle de cada um dos sistemas de controle do SCDC no caso tratado neste trabalho.

² Estas considerações podem ser respaldadas a partir de uma análise das normas IEC 61499 e IEC 61131.

4.1 E-MFG com elementos comunicadores

Este item apresenta a proposta de uma extensão para o Mark Flow Graph Estendido (E-MFG) (Anexo A), através da inserção de elementos comunicadores, necessários para modelar os sistemas de controle considerando-se o contexto de ambiente distribuído de controle. Inicialmente, discute-se a forma como se realizam as trocas de sinais num modelo representado por E-MFG, no qual a origem e o destino destes sinais são determinados de forma fixa através das portas conectados nos elementos do grafo. Em seguida, apresentam-se os elementos comunicadores, que permitirão representar as interfaces para troca de mensagens e, por fim, apresentam-se os modelos de atividades de comunicação utilizando o E-MFG com elementos comunicadores.

4.1.1 O E-MFG e a troca de sinais por Portas e Arcos de saída

Considerando-se o paradigma de orientação a objetos, Eckel (2000) observa que as mensagens que os objetos de uma determinada classe poderão receber são uma caracterização importante desta classe. Para que o E-MFG comporte a abstração das interfaces de comunicação, torna-se necessária uma reavaliação dos seus mecanismos de troca de informação, verificando a sua adequação para comportar a comunicação através de mensagens.

O MFG, originalmente desenvolvido para descrever o controle de um processo produtivo, possui entre seus elementos estruturais básicos os arcos de sinal de saída para representar a transmissão de sinais aos dispositivos externos. A recepção de sinais externos que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos pode ser representada através de portas habilitadoras e inibidoras .

A Figura 4.2 apresenta um exemplo de grafo com estas representações de transmissão e recepção de sinais, que retrata uma conexão típica entre o controle de processos e o objeto de controle. No exemplo, quando o processo representado pelo grafo MFG inicia a atividade /EtapaX, o Box B1 é marcado, e então o arco de sinal de saída envia um sinal de atuação para o elemento externo indicando que o processamento referente à etapa deve ser realizado (sinal do tipo habilitador/“enable”). Ao término do processamento, o elemento externo envia ao controle um sinal de sensoriamento indicando o término. Este sinal habilita a ocorrência do evento referente à transição T1, e o processo evolui para a próxima etapa.

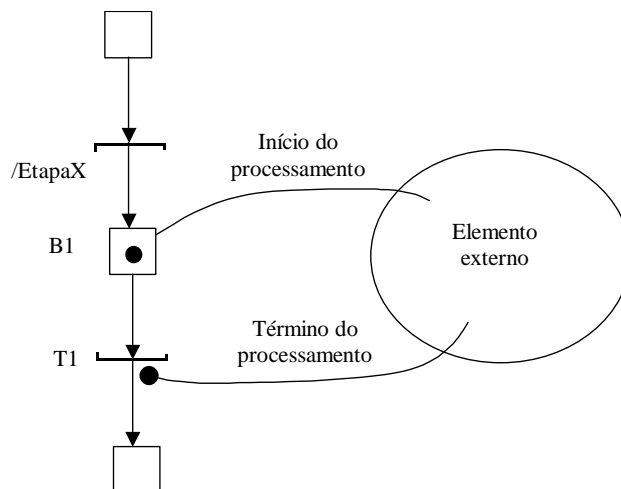


Figura 4.2. Exemplo de um grafo MFG, com representação do envio e recepção de sinais através de portas e arcos de sinal de saída

A abordagem estruturada na modelagem do controle de processos evidenciou a existência de níveis semânticos de controle quando se deseja tratar o problema do

indeterminismo da seqüência em sistemas com múltiplos processos produtivos simultâneos: controle de processos e controle de recursos (SANTOS FILHO, 2000). Estes dois controles são organizados hierarquicamente, possuindo dinâmicas independentes, e estabelecem um intercâmbio de informações pertinentes para a evolução dinâmica.

A Figura 4.3 mostra um exemplo com dois grafos MFG independentes, conectados através de portas, que representam a troca de informações entre os grafos.

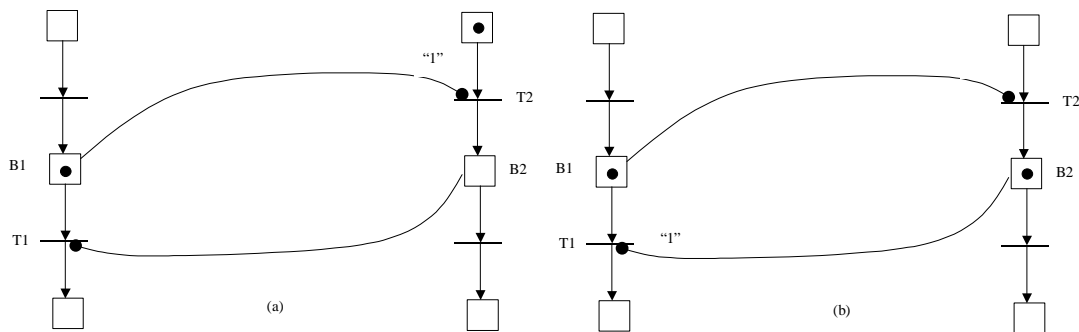


Figura 4.3 Grafos MFG conectados através de portas.

Assim, na arquitetura de controle proposta em (SANTOS FILHO, 2000), onde o controle de processos requisita (o recurso) ao coordenador de recursos, que efetivamente autoriza o uso do recurso pelo processo requisitante, existe esta comunicação do tipo requisição/resposta entre o coordenador de recursos e os vários processos. Cada um desses pares de requisição/resposta é representado através das portas e arcos de saída com origens e destinos fixados nos elementos estruturais dos grafos, como pode ser vista na Figura 4.4. Esta figura ilustra o grafo E-MFG com as regras adicionais para o controle da utilização dos recursos conectado aos sete grafos MFG de controle dos processos produtivos.

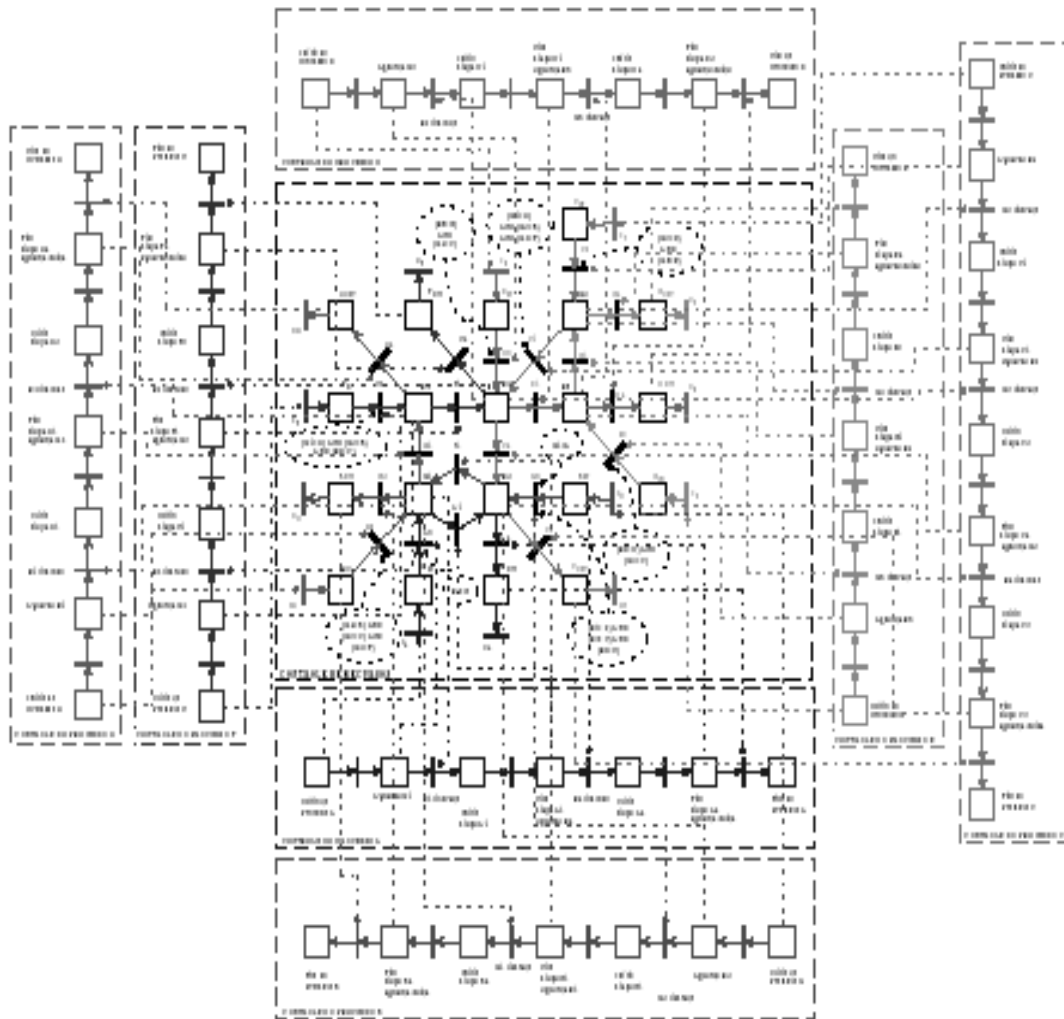


Figura 4.4. Grafo E-MFG de controle da utilização de recursos e grafos MFG de controle de processos produtivos. (figura retirada de (NAKAMOTO, 2002))

Com a finalidade de atender à necessidade de representar adequadamente os meios de interação entre os sistemas de controle, é proposta no próximo item uma extensão ao

E-MFG, para que se torne uma ferramenta de descrição adequada a este contexto de SCDC.

4.1.2 Elementos Estruturais do E-MFG com Comunicadores

A proposta dos elementos comunicadores adequa o E-MFG para modelar os vários sistemas de controle que, através da colaboração entre si, integram um sistema de controle distribuído.

Considerando os elementos estruturais do E-MFG (SANTOS FILHO, 1993), são inseridas novas extensões apropriadas para representar as comunicações a serem estabelecidas pelo sistema de controle com os outros elementos integrantes da arquitetura, adaptando-as e convertendo-as em elementos de interface de comunicação ou elementos comunicadores. Assim, o E-MFG com elementos comunicadores é composto pelos seguintes elementos estruturais estendidos (do E-MFG) e elementos de interface de envio e interface de recepção de mensagens.

- Transições: mantém a função de indicar a ocorrência de eventos e admitem inscrições que representam regras adicionais restritivas para a evolução do estado do sistema;
- Boxes: mantém a função de indicar as pré e pós-condições, representando a natureza condição-evento do sistema;

- Arcos orientados: mantém a função de estabelecer uma relação causal, ou de precedência entre os eventos e as condições e vice-versa, e podem conter inscrições variáveis que controlam a transmissão dos atributos das marcas individuais.
- Marcas: indicam a manutenção de uma condição; podem ser individualizadas por atributos.
- Interfaces de envio de mensagem: substituem os arcos de sinal de saída do MFG e transmitem informações aos elementos externos, através da emissão de uma mensagem assíncrona eventual no disparo da transição de emissão;
- Interfaces de recepção de mensagem: substituem as portas habilitadoras e inibidoras na função de habilitar ou inibir a ocorrência de eventos; consistem-se de um box receptor para conter a marca referente à mensagem recebida e de arcos receptores que conectam o box receptor às transições a serem habilitadas ou inibidas.

Nos seguintes itens apresentam-se detalhadamente as interfaces de envio e as interfaces de recepção.

4.1.3 Interface de envio

Uma interface de envio de mensagem corresponde à chamada de um método de outro objeto, e é formada pelos seguintes elementos:

- Transição de envio (ou transmissor): indica a ocorrência do evento de envio de uma mensagem; A inscrição indica o método chamado.
- Arco de envio (ou arco transmissor): conecta a transição de envio ao box de origem.

A Figura 4.5 mostra a representação gráfica destes elementos.

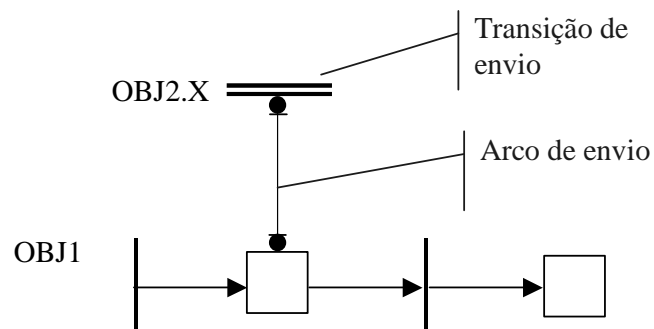


Figura 4.5. Interface de envio de mensagens do E-MFG.

A Figura 4.6 apresenta um exemplo de interface de envio, com os arcos de dados. O arco leitor de dados “coleta” os dados que serão transmitidos, referenciando os atributos que serão passados como parâmetros na chamada do método. Cada arco corresponde a um dado que compõe a mensagem a ser enviada. Um arco de dado aceita inscrições como por exemplo o identificador e tipo do atributo.

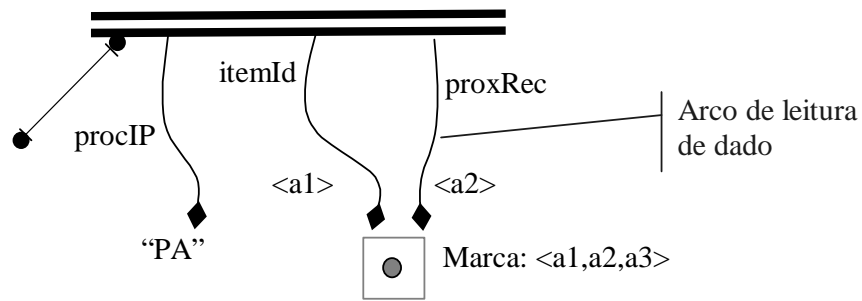


Figura 4.6. Exemplo de interface de envio, com arcos de dados.

4.1.4 Interface de recepção

Uma interface de recepção de mensagens é formada pelos seguintes elementos:

- Box de recepção (ou receptor): indica a recepção de uma mensagem; os atributos da marca contêm os dados recebidos;
- Arco de recepção (ou arco receptor): conecta o box de recepção à transição que inicia o processamento desta mensagem;
- Direcionador: modifica o peso dos arcos de recepção, conforme os valores dos atributos da marca do box de recepção, de forma a direcionar a mensagem recebida.

A Figura 4.7 mostra a representação gráfica destes elementos.

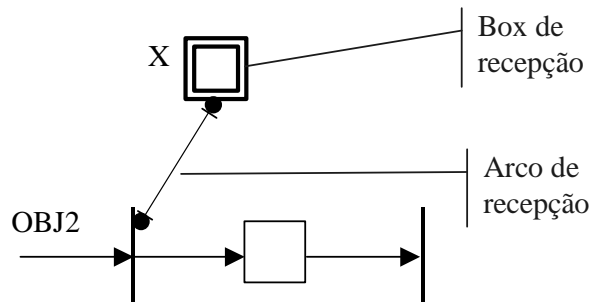


Figura 4.7. Interface de recepção de mensagens.

A Figura 4.8 mostra um exemplo de interface de recepção com dois arcos receptores, e um direcionador baseado em regras de produção.

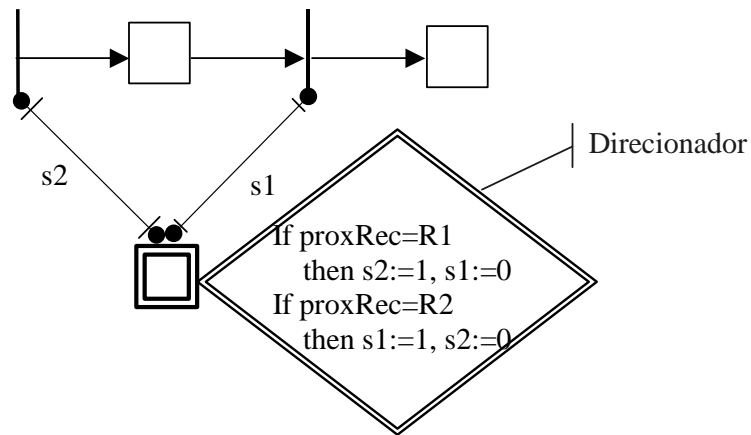


Figura 4.8. Exemplo de interface de recepção, com dois arcos receptores e um direcionador baseado em regras de produção.

Definidas as interfaces de comunicação num grafo E-MFG, apresentam-se a seguir exemplos de possibilidades de modelos de atividades de comunicação, de envio e de recepção, presentes em sistemas de controle de SP.

4.1.5 Atividade de comunicação - Envio

A atividade de comunicação de envio de mensagem ocorre quando um sistema de controle necessita interagir com um outro com a finalidade, por exemplo, de requisitar um serviço, ou informar um status, etc.

A Figura 4.9 apresenta um exemplo de modelo desta atividade de envio, utilizando-se a interface de envio proposta no item anterior.

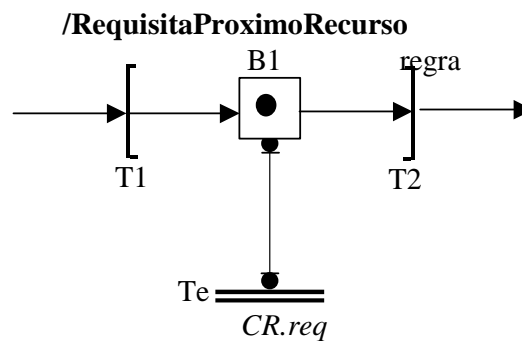


Figura 4.9. Exemplo de modelo E-MFG de uma atividade de envio.

4.1.6 Atividade de comunicação – Recepção

Uma atividade de comunicação de recepção ocorre quando um método de um objeto é chamado, através de uma mensagem. A partir desta atividade, o processamento requisitado pode ser executado, e o resultado pode ser enviado como retorno.

A Figura 4.10 apresenta um exemplo de modelo desta atividade de recepção, utilizando-se a interface de envio proposta no item 4.4.

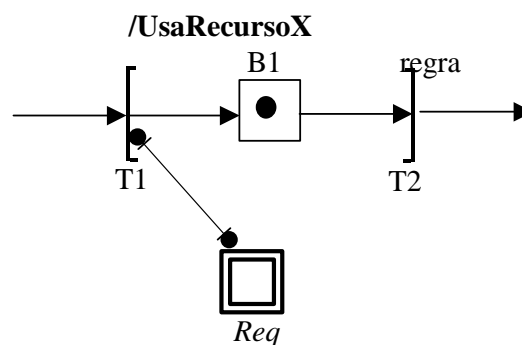


Figura 4.10. Exemplo de modelo E-MFG de uma atividade de recepção.

No exemplo da figura 4.10, T1 e T2 são respectivamente as transições de início e de término da atividade **/UsaRecursoX**. Quando uma mensagem chega no box **Req**, é instanciada uma marca individual cujos valores de atributos são os dados recebidos. Então T1 dispara marcando B1, que indica o processamento do serviço solicitado, terminando assim a atividade de recepção e retorno.

4.1.7 Dinâmica das regras de disparo

O comportamento dinâmico é observado através da evolução da marcação estabelecida pela regras de disparo de transição e regras de manutenção dos atributos das marcas individuais.

As regras de disparo de transição definidas em (SANTOS FILHO, 1993), são organizadas hierarquicamente em três níveis:

- Primeiro nível: regras de restrição adicionais de disparo;
- Segundo nível: regras de habilitação de disparo;
- Terceiro nível: regras de realização de disparo;

Os elementos para interfaces de comunicação são considerados, mas não se modifica o conjunto de regras adotadas para o MFG e o E-MFG herdadas das redes C/E.

O primeiro nível corresponde às regras de restrições adicionais de disparo, que são funções lógicas agregadas às transições e que representam estratégias de controle específicas. São representadas também através destas regras adicionais a(s) regra(s) que indicam a conclusão da atividade de comunicação, que serão avaliadas neste nível. Uma transição que satisfaz as regras de restrições adicionais é denominada transição em prontidão.

O segundo nível corresponde às regras de habilitação de disparo, onde é verificada a manutenção das pré-condições e pós-condições do evento, e também o estado de inibição/habilitação das portas. Um cuidado deve ser tomado na verificação das pré-condições em relação à marca com restrições, que é uma marca que entrou num box funcional mas que ainda sofre restrições funcionais de acordo com a natureza deste box, não estando ainda disponível. Neste nível, o box receptor conectado à transição por arco de comunicação deve ser interpretado como uma pré-condição do evento. Uma transição em prontidão é denominada transição habilitada se satisfizer as seguintes condições de habilitação:

- Não há box de saída com marcas;
- Não há box de entrada sem marcas ou com marcas com restrições;
- Não há box receptor em sua entrada sem marcas;

No terceiro nível são verificadas as regras de arbitragem de conflito e também são verificadas as regras de filtragem seletiva dos atributos de acordo com as inscrições nos arcos. Uma transição habilitada que já tenha as possíveis situações de conflito arbitradas e que já tenha as condições de filtragem seletiva averiguadas é denominada transição disparável.

Ao final da verificação das regras do terceiro nível, todas as transições disparáveis disparam imediatamente, fazendo com que o grafo evolua para uma nova marcação³.

³ Observa-se que as situações de conflito já foram arbitradas, ou seja, o disparo de uma transição disparável não afeta o disparo de outra na mesma marcação.

A aplicação do E-MFG com elementos comunicadores apresentado neste item permite a modelagem do controle dos processos produtivos e a modelagem do controle de uso dos recursos de transformação, considerando-se agora o contexto de comunicação através de uma rede.

4.2 Controle de Processos

Um processo produtivo correspondente a um item é constituído por uma seqüência de etapas. O controle de processos objetiva assegurar a realização da seqüência de etapas do processo produtivo que resulta no produto ou prestação do serviço.

A metodologia PFS/E-MFG estruturada (SANTOS FILHO, 2000) é uma metodologia de modelagem do controle de processos que para ser aplicada ao sistema de controle de processos no contexto de SCDC precisa ser modificada no seguinte aspecto:

- A interação com os elementos externos é agora realizada através de mensagens, e não mais por simples troca de sinais de controle e sensoriamento. Assim, os arcos de sinais de saída e as portas dão lugar às interfaces de transmissão e interfaces de recepção respectivamente. As mensagens precisam ser definidas, para que contenham as informações a serem trocadas na interação, através da definição dos atributos das marcas das interfaces de comunicação.

Portanto a metodologia PFS/ E-MFG com comunicadores engloba as seguintes etapas:

- I. Representação de cada processo por um modelo PFS de alto nível de abstração.
- II. Detalhamento de cada processo em atividades, definindo a lógica de seqüenciamento inerente a cada um deles.
- III. Detalhar as atividades dos processos através de modelos E-MFG.
- IV. Mapeamento das mensagens de controle indicando os eventos gerados pelo controlador a partir das interfaces de transmissão e o mapeamento das mensagens recebidas a partir das interfaces de recepção. E, definição do conjunto de atributos a ser associado a cada marca das interfaces de comunicação e que determinam a informação transmitida pelas mensagens.

Desta forma obtém-se os modelos E-MFG de controle de processos produtivos, que descreve a seqüência de etapas produtivas a serem realizadas em cada item. Passa-se agora para a modelagem do controle de uso dos recursos compartilhados por esses processos produtivos.

4.3 Controle de Transformação

O sistema de controle de recursos de transformação, ou controle de transformação, situa-se num nível hierárquico superior ao dos controles de processos produtivos. Tem

como objetivo controlar o uso dos recursos de transformação utilizados pelos processos produtivos em suas etapas. Deve modelar a seqüência de uso destes recursos para que então sejam aplicadas as regras de controle que irão conduzir ao comportamento desejado do sistema.

A seqüência de uso dos recursos é pré-determinada localmente em cada um dos processos produtivos mas, dada a execução simultânea de vários processos que compartilham um conjunto de recursos, resulta num processo global onde não é possível pré-determinar a seqüência de uso dos recursos. Esse processo global apresenta dois graus de indeterminismo: o indeterminismo em relação ao tempo e o indeterminismo em relação à seqüência.

O problema de se controlar o processo global de uso dos recursos é tratado em (SANTOS FILHO, 2000) aplicando-se o conceito de modelos complementares. Isto é, ao invés de se modelar a disponibilidade dos recursos e sua alocação, modela-se a ocupação dos recursos ou o uso dos recursos.

Desta forma, a seqüência de uso dos recursos é modelada inicialmente utilizando-se o grafo não marcado do tipo Grafo de Alocação de Recursos (GAR) (Anexo B) e em seguida ela é transformada no modelo E-MFG, no qual a dinâmica é representada, e então as regras de controle são adicionadas ao modelo E-MFG para obter-se o modelo de controle de recursos de transformação.

Este procedimento para se obter o controle de recursos de transformação, assim como no caso do controle de processos, necessita ser adequado para o contexto de SCDC, adotando o uso do E-MFG com comunicadores.

A metodologia GAR/E-MFG com comunicadores, para se obter o controle de recursos de transformação, consiste nas seguintes etapas:

- I. Obter o E-MFG global de utilização de recursos;
- II. Obter as regras adicionais de controle;
- III. Mapear as mensagens de controle geradas a partir das interfaces de transmissão e mapear as mensagens recebidas a partir das interfaces de recepção. E definir o conjunto de atributos a ser associado a cada marca das interfaces de comunicação e que determinam a informação transmitida pelas mensagens.

O procedimento para obter o E-MFG global de utilização de recursos de transformação de SP consiste em:

- a) Gerar o GAR associado a cada elemento a ser processado.
- b) Construir o grafo marcado de utilização dos recursos E-MFG equivalente a cada GAR.
- c) Aplicar a técnica de fusão de lugares para obter o grafo E-MFG de utilização dos recursos correspondente ao nível global do sistema.

O procedimento para obter as regras adicionais de controle consiste em:

- a) Identificar os Ciclos Fechados de Espera (CFE) do GAR global de uso dos recursos.

- b) A cada CFE associar o conceito de marcação no E-MFG equivalente ao estado de “deadlock”.
- c) Em cada CFE, identificar os pontos de intersecção e:
 - i) Associar para cada ponto um estado anterior ao estado de “deadlock”.
 - ii) Aplicar um conjunto de regras para identificar este estado e associar estas regras como regras adicionais de controle desabilitadoras da transição de entrada do box do grafo E-MFG correspondente ao ponto de intersecção do GAR em questão.

Desta forma obtém-se o modelo de controle de uso dos recursos de transformação. O próximo item apresenta a modelagem do controle de transporte, ou seja do controle de fluxo de itens nos SP.

4.4 Controle de Transporte

Será apresentado o sistema de controle de transporte responsável pelo controle do fluxo de itens nos SP. Considerando que os SP são constituídos por unidades produtivas (UP) como sendo agrupamentos lógicos de recursos que atendem a um conjunto de processos simultâneos, o controle do fluxo de itens em questão, pode contemplar duas situações:

- requisições de transporte limitadas a uma determinada UP, ou

- requisições de transporte entre UP.

Para a execução do controle propriamente dito, faz-se necessário incorporar habilidades a este sistema relacionadas à designação de veículos transportadores (VT) e às regras adicionais de controle para evitar-se o travamento dos processos.

4.4.1 Regras Adicionais de Controle

Um determinado item produzido em uma UP pode ser encaminhado para outra UP para que prossiga a sua seqüência de produção, conforme a seqüência determinada pela sua rota, o que origina dentro de SP a transferência de itens entre as UP.

O controle do fluxo de itens entre UP pode ser considerado um problema do domínio do controle de recursos de transporte, pois consiste em responder a perguntas tais como: quais itens devem ser transportados e como serão transportados ?

O objetivo passa a ser como modelar a ocupação das UP durante a evolução dinâmica dos processos produtivos e então agregar estratégias de controle que sejam necessárias para garantir o comportamento desejado para o sistema global.

Traçando uma analogia à modelagem do uso de recursos em controle de recursos de transformação, apresenta-se uma outra interpretação para os grafos de alocação de recursos, GAR, para que sejam aplicados no controle dos fluxos de itens entre as UP.

O GAR é um grafo orientado não marcado. Um par formado por um nó e o respectivo arco orientado de saída é denominado par de alocação enquanto um par

formado por um nó e o respectivo arco de entrada é denominado par de requisição (HASEGAWA ET AL., 1996).

Em um par de alocação o nó r_q representa uma determinada UP e o arco orientado de saída possui uma inscrição fixa que representa o processo $s_q(j)$ que está sendo realizado em r_q . Por sua vez, em um par de requisição o nó r_q também representa uma determinada UP e o arco orientado de entrada possui uma inscrição fixa que representa o processo $s_q(i)$ que requisita a entrada em r_q para a realização do próximo processo.

A Fig. 4.11 ilustra a representação destes pares para o caso de um mesmo item em uma determinada etapa da rota de sua seqüência de produção.

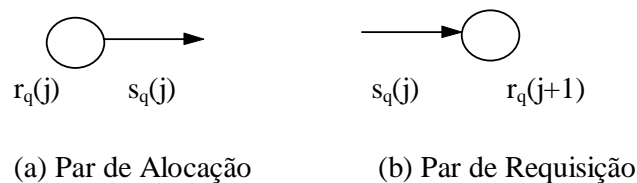


Figura 4.11. Elementos do GAR

Em princípio, é possível considerar que as rotas dos itens são modeladas a partir de uma seqüência de UP visitadas para realizar uma seqüência de processos que compõem a rota em questão. Seja Q o conjunto de N itens diferentes a serem processados em um SP, de acordo com a expressão (4.1).

$$Q = \{q_k \mid k \in \mathbf{N}, k \leq N\} \quad (4.1)$$

Onde:

q identifica o item;

\mathbf{N} é conjunto de números naturais

Considera-se que existe uma seqüência de processos associada a cada item q a qual, por sua vez, agrega uma seqüência de UP a serem visitadas. Neste contexto, é possível dividir a seqüência de processos em etapas, de maneira que a cada uma destas etapas o item ocupa uma UP. Como resultado, obtém-se uma seqüência de produção p_q do item q , de acordo com a expressão (4.2).

$$p_q = \{s_q(0), s_q(1), \dots, s_q(L_q), s_q(L_q + 1)\} \quad (4.2)$$

Onde:

L_q representa o comprimento da seqüência de produção do item q

$s_q(i)$ representa a i -ésima etapa da seqüência de produção do item q

$s_q(0)$ representa a condição inicial para iniciar a seqüência de produção

do item q

$s_q(L_q + 1)$ representa a condição correspondente ao estado em que a seqüência de produção do item q está concluída

A partir destas informações, define-se a seqüência de UP (ou rota) r_q^* correspondente à seqüência de produção p_q do item q , de acordo com a expressão 4.3.

$$r_q^* = \{r_q(1), r_q(2), \dots, r_q(L_k)\} \quad (4.3)$$

Onde:

$r_q(j)$ representa a UP ocupada na etapa $s_q(i)$ da seqüência de produção do item q

A partir das três expressões apresentadas, o procedimento para a geração do modelo GAR de uma rota de um item é sistematizada da seguinte maneira:

- a) Dado um item pertencente ao conjunto Q da expressão (4.1);
- b) Relaciona-se o conjunto de UP associadas a este item através da expressão (4.3). Estas UP são modeladas através de nós no GAR.
- c) De acordo com as informações obtidas pela expressão (4.2), modelam-se as etapas da seqüência de produção do item através dos arcos orientados.

Para obter-se um modelo global de ocupação das UP considerando os vários processos, é necessário aplicar a técnica de fusão de lugares (BARROS; PERKUSICH, 1998) nos vários grafos E-MFG correspondentes aos modelos obtidos para os vários itens com seus processos associados.

A seguir, apresenta-se o procedimento para obtenção do modelo E-MFG global de ocupação de UP de SP:

- a) Gerar o GAR associado a cada item a ser processado.
- b) Construir o grafo E-MFG de ocupação das UP equivalente a cada GAR.
- c) Aplicar a técnica de fusão de lugares para obter o grafo E-MFG de ocupação das UP no nível global do sistema.

Há uma observação pertinente ao modelo E-MFG de ocupação das UP que é importante destacar: a ocupação da UP $r_q(j)$ é modelada por um box capacidade $Cr_q(j)$ para permitir a representação do número de itens comportados pelas entradas/saídas das UP no sistema

Os modelos de ocupação de UP dos diferentes itens produzidos em SP representam processos independentes que ocorrem simultaneamente no SP. Em SP onde ocorrem intersecções entre as rotas dos itens, ocorre o indeterminismo em relação à seqüência de ocupação das UP, além do indeterminismo em relação ao tempo. Apesar de cada um dos processos ter uma seqüência pré-determinada de ocupação das UP, não se pode definir a seqüência global até que sejam estudados em conjunto. Diz-se então que o processo global resultante apresenta uma complexidade emergente.

Neste trabalho, uma vez modelada a ocupação das UP, os mesmos princípios aplicados no controle de recursos em (SANTOS FILHO, 2000) serão aplicados para a obtenção do controle da ocupação das UP, ou controle do fluxo entre UP, no sentido de não travar o fluxo de itens, isto é, de evitar o estado de “deadlock”.

Apesar de ser possível a aplicação das mesmas técnicas apresentadas em (SANTOS FILHO, 2000) e sistematizadas em (NAKAMOTO, 2002) para detecção do estado anterior ao “deadlock” e identificação da marcação correspondente no E-MFG, e a estratégia de controle “flow in suppression”⁴, é necessária uma modificação no procedimento de geração das regras adicionais de controle, para que reflita melhor a consideração de capacidades múltiplas das UP representadas pelos boxes capacidades no E-MFG.

⁴ Para impedir que o sistema evolua para o estado de deadlock, a estratégia “Flow In Suppression” consiste em desabilitar a entrada de novos itens ao CFE, até que o sistema saia do estado anterior ao “deadlock”.

A abordagem “deadlock avoidance” consiste em, durante a evolução dinâmica do sistema, detectar o estado anterior ao “deadlock” e então inibir a ocorrência de eventos que levam ao estado não desejado de “deadlock”. Assim a evolução dinâmica do sistema é sempre guiada para estados seguros, isto é para estados que não representam “deadlock”. (BANAZAK & KROGH, 1990); (VISWANADHAN ET AL., 1990); (FANTI ET AL., 1997).

A estratégia FIS (“flow in suppression”) de “deadlock avoidance” baseia-se no fato de que em SP a condição para que ocorra o “deadlock” é a ocorrência de espera circular. Estas cadeias circulares de espera podem ser identificadas no modelo GAR de seqüência de uso de recursos, e são denominados CFE (Ciclos Fechados de Espera).

O nó correspondente à intersecção dos fluxos é denominado nó de intersecção e o par de alocação cujo nó é o nó de intersecção é denominado PAI (Par de Alocação de Intersecção).

Neste contexto, deve-se inicialmente selecionar as transições do E-MFG correspondentes aos PAI pertencentes a CEF no GAR global. Cada uma dessas transições corresponde à entrada de um item ao respectivo CFE e o seu disparo influencia na condição do CEF, de estar ou não no estado anterior ao “deadlock”. A Figura 4.12 (a) mostra o PAI $r_q(j) s_q(j)$ pertencente ao CFE e a Figura 4.12 (b) mostra a transição $s_q(j-1)$ de entrada ao ciclo no modelo E-MFG correspondente.

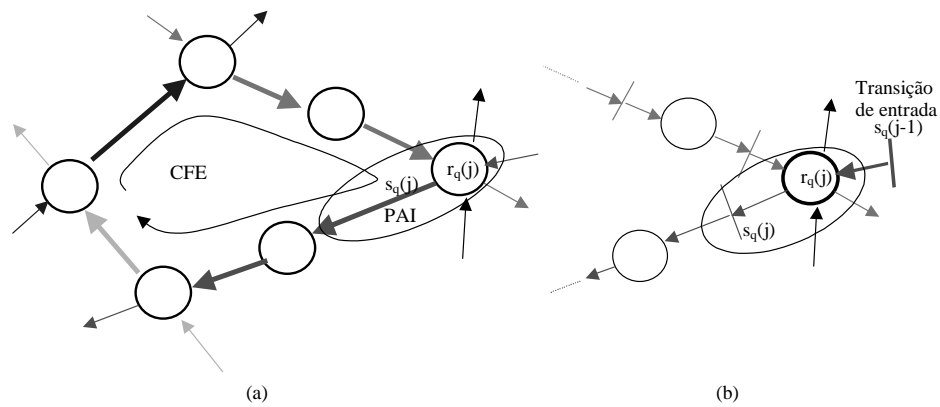


Figura 4.12. (a) Exemplo de CFE e PAI no modelo GAR.
 (b) Parte do modelo E-MFG referente ao modelo (a).

Para cada uma destas transições deve-se considerar regras adicionais de controle que identificam a marcação correspondente ao estado anterior ao “deadlock” e, identificado este estado, esta transição é desabilitada até que o sistema mude de estado. As ações de inibição de eventos que possam levar ao “deadlock” são dinamicamente selecionadas e executadas conforme o estado atual do sistema. Essas regras adicionais de controle são representáveis por regras de produção na forma da seguinte expressão (4.4):

$$\text{If } \langle \text{condição} \rangle \text{ Then } \langle \text{ação} \rangle \quad (4.4)$$

Onde:

- *condição* é a condição de detecção do estado de pré-deadlock, apresentada adiante na expressão (4.5);
- *ação* é a desabilitação do disparo da transição através do sinal do arco inibidor.

O estado de “deadlock” é o estado em que todos os recursos correspondentes aos nós do CFE estão em estado de espera circular, isto é, estão ocupados em sua capacidade máxima pelos itens cujo fluxo formam o CFE. O estado anterior ao “deadlock”, ou anterior ao “deadlock”, pode ser detectado quando todos os nós do CFE estão em estado de espera circular, a menos de um nó que possui apenas uma posição desocupada remanescente. Observa-se que não se deve considerar os itens que, apesar de ocuparem uma UP r_q do CFE em sua rota, não fazem parte do CFE. Assim cada CFE tem uma condição de estado anterior ao “deadlock”, representada através da seguinte expressão:

$$\left[\sum_j \sum_q cap(Cr_q(j)) - \sum_j \sum_q m_q(Cr_q(j)) \right] = 1 \quad (4.5)$$

Onde:

$cap(Cr_q(j))$: capacidade máxima do box $Cr_q(j)$;

$m_q(Cr_q(j))$: ocupação ou marcação atual do box $Cr_q(j)$ pelo item q ;

$Cr_q(j)$: Box capacidade correspondente ao nó r_q , tal que o par de alocação $r_q(j), s_q(j)$ pertence ao CFE.

Em síntese, o procedimento para definir-se o conjunto de regras adicionais de controle que deve ser associado a determinadas transições do grafo E-MFG de controle de ocupação de UP de SP é o seguinte:

- a) Identificar os ciclos fechados de espera (CFE) do GAR associado ao SP.

- b) Para cada CFE :
- i. associar o conceito de marcação no E-MFG equivalente ao estado de “deadlock”, e descrever a condição que identifica o estado anterior ao “deadlock”, pela expressão (4.5);
 - ii. identificar os pontos de entrada de itens, que são as transições de entrada dos boxes correspondentes aos PAI pertencentes ao CFE;
 - iii. Associar a regra adicional de controle, composto pela condição de identificação do estado anterior ao “deadlock” e pela ação inibidora da transição, aos pontos de entrada de itens.

Desta forma, obtêm-se as regras adicionais para o controle de fluxo de itens de SP.

No item seguinte apresenta-se a estratégia de designação de veículos transportadores.

4.4.2 Designação de Veículos Transportadores

O fluxo de itens em SP é realizado efetivamente através do subsistema de transporte composto pelos recursos de transporte, como por exemplo os transportadores de rotas fixas ou os veículos autônomos.

No caso tratado neste trabalho, os recursos de transporte são os veículos autônomos com elevado grau de flexibilidade operacional, no sentido de terem autonomia para a escolha da rota para realizar a tarefa de transporte. Assim, o sistema de controle de recursos de transporte, ou simplesmente controle de VT (Veículos Transportadores),

restringe-se inicialmente a especificar pares de estação origem e estação destino que os VT devem percorrer para realizar o fluxo de materiais. O problema principal consiste em estabelecer-se um procedimento que designa cada um dos VT para atender às requisições de transporte que surgem durante a evolução dinâmica dos SP. Quando ocorre uma requisição de transporte, uma das tarefas do sistema de controle de VT é selecionar qual VT deve ser enviado para atender à requisição. Esta tarefa de alocar os VT durante a execução dos processos produtivos, e não previamente designado, é uma tarefa que possui um certo grau de complexidade diretamente proporcional à flexibilidade operacional que é atribuída aos próprios VT.

A dificuldade de se especificar o comportamento dinâmico de um sistema baseado em VT que atenda às necessidades dos SP advém da própria natureza destes sistemas, cuja evolução dinâmica apresenta dois graus de indeterminismo: indeterminismo em relação ao tempo e indeterminismo em relação à seqüência de eventos. Este comportamento dinâmico do sistema de transporte é o principal obstáculo para o desenvolvimento de sistemas de controle que gerenciam o fluxo de VT.

O presente trabalho adota a solução proposta em (SANTOS FILHO, 1998), para a solução do problema de alocação e distribuição de VT nesta classe de sistemas. Neste contexto, é apresentado um procedimento que consiste nas seguintes etapas:

- I. Definição de um ponto estratégico representativo de toda a demanda de transporte do sistema para ser utilizado como referência no procedimento;
- II. Particionamento do sistema produtivo em regiões de maneira que a cada região aloca-se um VT;

- III. Determinação de pontos de estacionamento temporário dos VT;
- IV. Especificação de algoritmos de controle para a manutenção da distribuição dos VT e alocação dos mesmos de acordo com as demandas de transporte de cada estação de carga/descarga que compõem o sistema produtivo.

Os detalhes deste procedimento estão descritos no anexo C.

Uma vez modelados os comportamentos dos sistemas de controle individualmente, faz-se necessário determinar o comportamento que os sistemas de controle apresentam conjuntamente, isto é, através da interação, o que será apresentado no próximo item.

4.5 Comportamento colaborativo

Cada um dos sistemas de controle tem a sua especialidade, tendo acesso às informações de seu domínio. Durante a evolução dinâmica de SP pode ocorrer uma situação no qual um sistema de controle necessita de ações conjuntas de um controle de outro domínio para atingir efetivamente o seu objetivo. Estas ações conjuntas devem ser coordenadas através de um comportamento especificado, para que convirja no sentido de atender ao objetivo dos SP, denominado neste trabalho de comportamento colaborativo.

A interação entre os sistemas de controle ocorre pela comunicação através de troca de mensagens. A especificação do comportamento colaborativo deve considerar os seguintes aspectos: definição das mensagens ou seja, das informações que compõem as mensagens, a seqüência de mensagens e o comportamento dos sistemas que participam da interação.

Para modelar as informações são necessárias técnicas e procedimentos adequados para este propósito. Torna-se necessário determinar as mensagens enviadas e recebidas e, então, identificar as informações contidas nestas mensagens. Uma vez identificadas as informações, pode-se classificá-las e identificar as classes de informações necessárias para a interação colaborativa, descrevendo-as através de diagramas da UML. Este procedimento de definição das classes de informação segue os passos utilizados na norma ISA S95 (1999) para definição dos modelos de objetos para informações entre o nível gerencial (nível 4 – sistemas de planejamento e logística) e de controle (nível 3 – sistemas de operações de manufatura e controle), de acordo com o modelo hierárquico de referência. Os passos são:

- a) Identificação dos domínios;
- b) Identificação das funções de interesse (dentre as funções existentes nos domínios), ou seja, as funções que necessitam interagir com outros domínios;
- c) Identificação do fluxo de informação entre as funções de interesse que cruzam as fronteiras dos domínios, denominadas informações de interesse;
- d) Classificação das informações de interesse, conforme as categorias de informação;
- e) Descrição das classes de informação identificadas através de diagrama de classes da UML.

Quando esses passos são aplicados no SCDC, os domínios de informação referidos no passo a) são os domínios semânticos pertinentes aos problemas de controle; e as

funções de interesse referidas no passo b) são as funções de controle. Entende-se que as informações que fluem de um domínio para outro, ou seja, as informações enviadas através da comunicação são as informações inseridas nas mensagens trocadas entre os sistemas de controle. Portanto a identificação e classificação desses fluxos de informação de interesse leva à definição do conteúdo das mensagens no SCDC.

Assim, é possível definir-se as classes de informação a serem enviadas /recebidas nas interações entre os sistemas de controle do SCDC através dos passos apresentados.

Uma vez definidas as informações que compõem as mensagens, um outro aspecto importante na definição do comportamento colaborativo dos sistemas de controle é a seqüência em que ocorre a troca de mensagens. Para que a troca de informação resulte num comportamento colaborativo, é necessário modelar o processo de interação, representando a sua dinâmica, ou seja, especificar a seqüência de mensagens destas interações.

Partindo da arquitetura lógica de SCDC do *caso de uso* (Figura 3.6), onde estão identificados os domínios, que envolvem o controle de processos produtivos, o controle de recursos de transporte e o controle de recursos de transformação, observam-se os fluxos de informação que cruzam as fronteiras dos domínios, ou seja, as interações entre os domínios (Figura 4.13). As mensagens entre os controles dos processos produtivos e o controle de recursos de transformação são requisições de uso de recursos para a próxima etapa do processo produtivo e a respectiva resposta, ou autorização de uso. Entre o controle de processos e o controle de recursos de transporte também são trocadas mensagens similares, de requisição e de resposta, mas referentes aos veículos que são recursos de transporte. Entre o controle de recursos de transformação e o controle de

recursos de transporte ocorre uma colaboração para que juntos possam atender às requisições dos processos produtivos.

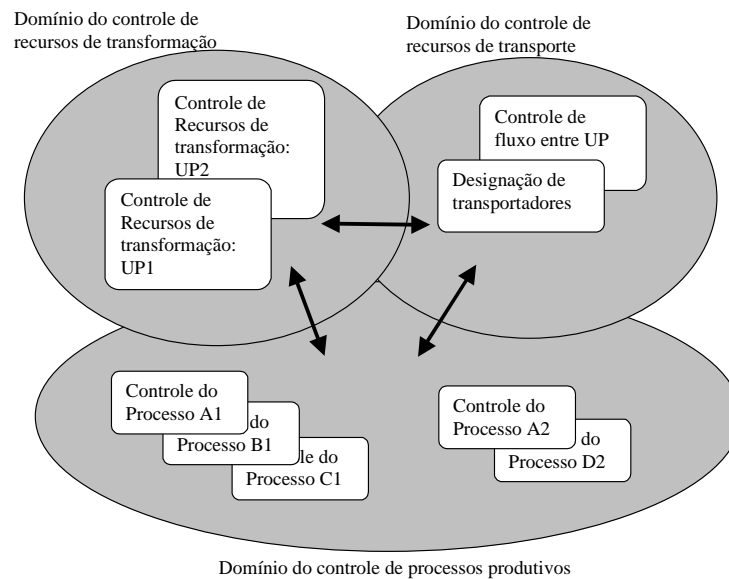


Figura 4.13. Fluxo de informações entre os domínios.

As interações através de mensagens de comunicação no SCDC refletem a evolução das normas, como por exemplo da IEC1131 para a IEC61499 (LEWIS 1998), no qual o contexto passa a ser o controle realizado por módulos de controle distribuídos. A IEC61499 padroniza os blocos funcionais (FB), oferecendo formas de interfaceamento entre as diversas funções de controle do sistema. A adequação dos SCDC às normas atuais que consideram o controle distribuído é fundamental no contexto deste trabalho.

CAPÍTULO 5

UMA SISTEMÁTICA PARA MODELAGEM DE SCDC

O desenvolvimento de um SCDC torna-se uma tarefa nada simples, por causa das necessidades dos sistemas de controle atenderem às diferentes semânticas cada qual em seu domínio de problemas e conseqüentemente da necessidade de se tratar com múltiplas técnicas de modelagem, cada qual adequada ao problema específico de controle.

Este capítulo apresenta uma proposta de sistemática para o desenvolvimento de SCDC, baseada numa abordagem híbrida “bottom-up” / “top-down”, e realizada de forma evolutiva.

5.1 Etapas do Desenvolvimento de SCDC

O desenvolvimento de um SCDC ocorre de forma evolutiva, num processo iterativo, através da realização das três etapas, que são:

1. definição da arquitetura lógica de controle;
2. definição dos comportamentos internos de cada um dos sistemas de controle;
3. definição do comportamento colaborativo.

Nos próximos itens apresentam-se as atividades que compõem cada uma das etapas, e então apresenta-se o processo de desenvolvimento, composto por essas etapas.

5.1.1 Etapa 1: Definição da arquitetura lógica

A Etapa 1, de definição da arquitetura lógica, tem como objetivo definir a estrutura lógica do sistema de controle como um todo, identificando os sistemas de controle integrantes do SCDC, as respectivas responsabilidades ou objetivos de controle, e as inter-relações que se estabelecem através da comunicação entre os sistemas de controle.

Para descrever a arquitetura lógica do SCDC são utilizados os diagramas estruturais da UML, ou seja, o diagrama de classes e o diagrama de objetos.

As seguintes atividades são necessárias nesta etapa:

- Tarefa 1.1: Identificar os domínios. Para isso, elabora-se o diagrama de classes dos elementos do SP, partindo da descrição das propriedades dos

elementos do SP, classificando-os segundo a finalidade funcional. Para cada classe de recursos identifica-se um domínio de semântica específica.

- Tarefa 1.2: Elaborar o diagrama de classes dos sistemas de controle do SCDC (denominadas classes de controle). Dentro de cada domínio situam-se os sistemas de controle relacionados à mesma semântica, que são diferenciados funcionalmente, isto é, para cada problema é necessário um sistema de controle com habilidades adequadas ao tratamento do problema. As relações são as interações através da comunicação entre os sistemas de controle.

O produto resultante desta etapa representa o modelo estrutural do SCDC.

5.1.2 Etapa 2: Definição dos comportamentos internos de cada um dos sistemas de controle

Cada um dos sistemas de controle deve ser modelado nesta etapa, aplicando-se as técnicas apropriadas a cada um deles. Esta etapa é detalhada conforme as técnicas de modelagem de controle apresentadas no capítulo 4, no *caso de uso* adotado para este trabalho, onde o SCDC é composto pelos sistemas de controle de processos, controle de recursos de transformação e controle de recursos de transporte,.

A) Modelagem do controle de processos produtivos

Aplica-se a metodologia PFS/E-MFG estruturada, apresentada no item 4.2 do capítulo 4, para cada processo produtivo do SP, seguindo os seguintes passos:

- V. Representação de cada processo por um modelo PFS de alto nível de abstração.

- VI. Detalhamento de cada processo em atividades, definindo a lógica de seqüenciamento inerente a cada um deles.
- VII. Detalhar as atividades dos processos através de modelos E-MFG.
- VIII. Mapeamento das mensagens de controle indicando os eventos gerados pelo controlador a partir das interfaces de transmissão e o mapeamento das mensagens recebidas a partir das interfaces de recepção. E definição do conjunto de atributos a ser associado a cada marca das interfaces de comunicação e que determinam a informação transmitida pelas mensagens.

Desta forma obtém-se os modelos E-MFG de controle dos processos produtivos.

B) Modelagem do controle de recursos de transformação

O controle do uso de recursos de transformação, para evitar o travamento dos processos produtivos, é baseado na metodologia GAR/E-MFG, apresentada no item 4.3 do capítulo 4, e consiste nos seguintes espaços:

- IV. Obter o E-MFG global de utilização de recursos;
- V. Obter as regras adicionais de controle;
- VI. Mapear as mensagens de controle geradas a partir das interfaces de transmissão e mapear as mensagens recebidas a partir das interfaces de recepção. Definir o conjunto de atributos a ser associado a cada marca referente à informação transmitida pelas mensagens.

C) Modelagem do controle de recursos de transporte

O controle de recursos de transporte, através das regras adicionais de controle, é baseado na metodologia GAR/E-MFG aplicada ao controle de fluxo entre unidades produtivas, apresentada no item 4.4.1 do capítulo 4, e consiste nas seguintes etapas:

- I. Obter o E-MFG global de ocupação das unidades produtivas;
- II. Obter as regras adicionais de controle;
- III. Mapear as mensagens de controle geradas a partir das interfaces de transmissão e mapear as mensagens recebidas a partir das interfaces de recepção. Definir o conjunto de atributos a ser associado a cada marca referente à informação transmitida pelas mensagens.

Em relação à designação de veículos transportadores, os procedimentos seguem as seguintes etapas:

- V. Definição de um ponto estratégico representativo de toda a demanda de transporte do sistema para ser utilizado como referência no procedimento;
- VI. Particionamento do sistema produtivo em regiões de maneira que a cada região aloca-se um VT;
- VII. Determinação de pontos de estacionamento temporário dos VTs;
- VIII. Especificação de algoritmos de controle para a manutenção da distribuição dos VTs e alocação dos mesmos de acordo com as demandas de transporte de cada estação de carga/descarga do sistema produtivo.

Assim obtém-se os modelos de controle para os subsistemas do SCDC.

5.1.3 Etapa 3: Definição do comportamento colaborativo

Esta etapa é necessária, pois apesar dos comportamentos individuais de cada um dos subsistemas terem sido definidos na Etapa 2, a parte relacionada ao comportamento colaborativo, ou seja, quando a evolução dinâmica de um sistema de controle é influenciada pelas informações de outros domínios, ainda não foi especificada.

Os aspectos importantes para que o comportamento colaborativo seja determinado são: definição do fluxo de informações e a definição da seqüência de mensagens.

A definição do fluxo de informações consiste na identificação do fluxo entre os domínios e definição das classes de informação enviadas e recebidas através das mensagens de comunicação entre as diferentes classes de controle. Para esta tarefa utiliza-se o diagrama de interação da UML, identificando-se todas as mensagens existentes na comunicação entre os sistemas de controle. Em seguida, para cada tipo de mensagem, definem-se as classes de informação contidas nas mensagens, descrevendo-as num diagrama de classes.

A definição da seqüência de mensagens consiste em especificar o processo de interação entre os sistemas de controle. Para isso é necessário identificar-se as interações como sendo “use cases” e então para cada “use case” elaborar o diagrama de seqüências.

Assim, a Etapa 3 constitui-se basicamente das seguintes tarefas:

- Tarefa 3.1: Definição do fluxo de informações. Elaborar o diagrama de interação, identificando-se todas os tipos de mensagens entre os sistemas de controle.
- Tarefa 3.2: Definição da seqüência de mensagens. Para cada “use case” de interação, identificar as mensagens pertinentes ao “use case”, e elaborar o diagrama de seqüência do “use case”.

5.2 Processo de Desenvolvimento

O processo de desenvolvimento de SCDC, no contexto da sistematização proposta, é caracterizado como :

- Processo híbrido. Mescla a abordagem top-down e a abordagem bottom-up (ZHOU & DICESARE, 1993), isto é:
 - a abordagem bottom-up é aplicada no todo do SCDC identificando-se os sistemas de controle autônomos para então determinar o comportamento do conjunto e
 - a abordagem top-down é aplicada na definição do comportamento interno de cada um dos sistemas de controle.
- Processo iterativo. A seqüência de realização das etapas não é “unidirecional” como nos modelos clássicos do tipo cascata de desenvolvimento e, portanto, não existe uma seqüência pré-determinada, pois os resultados de uma etapa influenciam todas as outras etapas, e isto

implica em retomar uma atividade anterior quando obtiver informação para detalhar melhor (PRESSMAN, 2000).

- Processo evolutivo. A cada ciclo de iteração é gerado um protótipo da especificação, que evolui com a sucessão dos ciclos iterativos, convergindo para um nível de precisão e detalhamento que se considere suficiente para a especificação do SCDC e então passar para as outras fases do projeto (PRESSMAN 2000).

As figuras que seguem apresentam o modelo do processo de desenvolvimento de SCDC, quando vistos como SED e descritos em PFS (MIYAGI, 1988). A sua característica de processo iterativo destaca-se no modelo gráfico, que abstrai a relação de precedência entre as etapas E1 a E3. Neste tipo de processo, denominado aqui de *modelo de pétalas*, a seqüência de atividades, isto é, a próxima atividade a ser realizada é determinada de acordo com o estado do item que flui.

Os modelos foram construídos através do detalhamento sucessivo dos elementos atividades do PFS. A figura 5.1 (a) apresenta o modelo do processo no mais alto nível de abstração (nível 0); e a Figura 5.1 (b) apresenta o modelo do processo ainda como um todo, mas já num segundo nível de abstração no qual o processo é detalhado através de suas principais etapas E1, E2 e E3.



Figura 5.1 (a). Modelo PFS do processo de desenvolvimento de SCDC (nível 0).

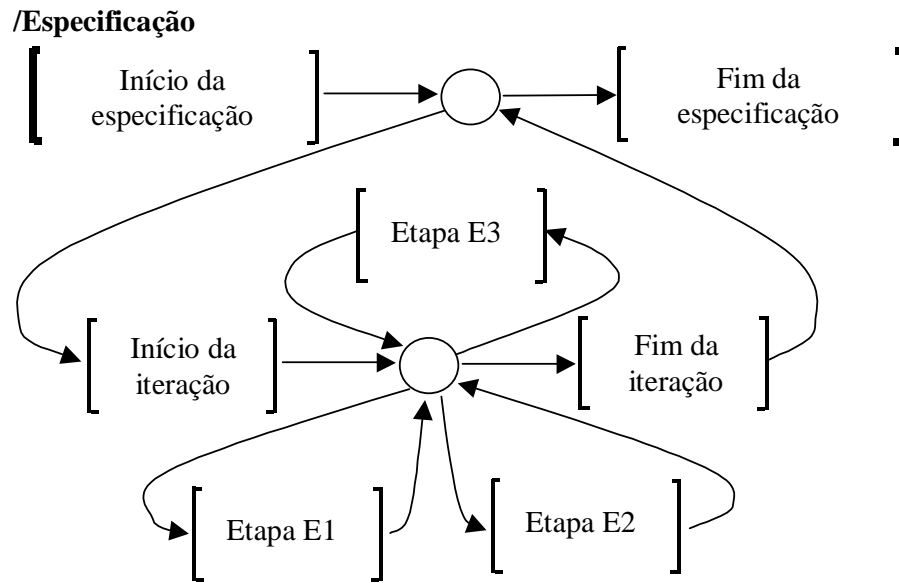


Figura 5.1 (b). Modelo PFS do processo de desenvolvimento de SCDC (nível 1).

Observa-se na Figura 5.1(b) que a cada iteração o processo produz um protótipo, que servirá de base para a iteração seguinte.

A figura 5.2 apresenta o detalhamento da Etapa E1, de definição da arquitetura lógica. Nota-se novamente o modelo de pétalas.

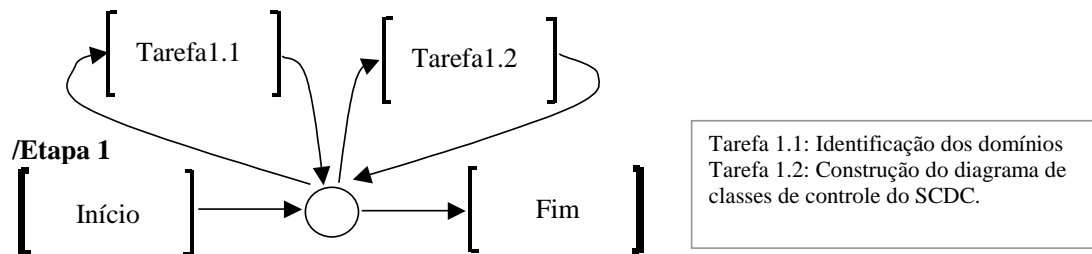


Figura 5.2 Detalhamento da Etapa 1 de definição da arquitetura.

CAPÍTULO 6

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo ilustrar a aplicação dos procedimentos para modelagem de SCDC apresentados neste trabalho, seguindo a sistemática proposta no capítulo anterior.

Inicia-se a modelagem instanciando a arquitetura lógica de controle para um SP enunciado. Para cada um dos sistemas de controle aplicam-se os procedimentos próprios de modelagem das estratégias de controle apresentados nos capítulos anteriores e definem-se as interfaces necessárias para troca de mensagens. As seqüências de mensagens necessárias para interação dos sistemas de controle são definidas, com destaque àquelas que definem o comportamento colaborativo do sistema como um todo. Estas etapas são desenvolvidas seguindo um processo iterativo de prototipagem, cujos resultados são apresentados neste capítulo.

6.1 Caso 1

6.1.1 Descrição do Caso 1

O SP a ser tratado é um sistema flexível de manufatura, capaz de produzir simultaneamente diversos itens, ou produtos, segundo diferentes seqüências de operações associadas a cada um destes produtos. A parte operativa do sistema constitui-se de várias estações de trabalho e o fluxo de materiais é realizado por um sistema de transporte baseado em veículos de transporte (VT) que podem ser autônomos ou dirigidos por motoristas. Este exemplo baseia-se no modelo apresentado em (NAKAMOTO 2002).

O SP em estudo é composto pelos seguintes elementos (Figura 6.1):

Seis estações de trabalho para processamento: R1, R2, R3, R4, R5 e R6;

Três estações de entrada de materiais que armazenam o estoque de matéria-prima que abastece as estações de trabalho: InAFG, InCE e InBD;

Três estações de saída que armazenam os estoques de produtos acabados: OutEG, OutDF e OutABC;

Dois veículos transportadores: VT1 e VT2.

Cada estação de trabalho possui um dispositivo manipulador dedicado, que realiza as operações de carga e descarga dos itens a serem processados, assim como uma máquina-ferramenta que processa um item por vez.

Para a realização do fluxo de materiais entre as estações, os VT movimentam-se sobre um circuito de via única, transportando um item de cada vez. Neste circuito, há

vários pontos de ramificação e confluência correspondentes aos desvios para a entrada e saída dos VT nas várias estações. À medida que os produtos são processados, os VT são requisitados pela estação correspondente.

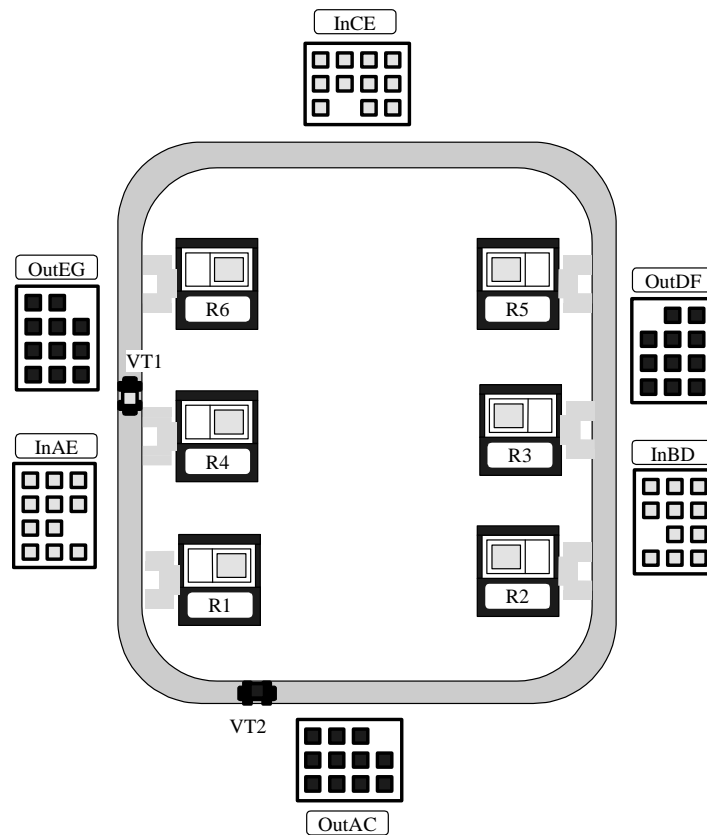


Figura 6.1. Esquema do SP com seus elementos.

Neste sistema serão processados sete tipos de itens:

$$Q = \{ A, B, C, D, E, F, G \} \quad (6.0)$$

Cada um destes produtos possui um determinado processo produtivo associado que, por sua vez, representa uma seqüência determinada de etapas que utiliza os recursos de acordo com as seguintes descrições:

Produto A:

$$r^*_A = \{ \text{InAFG}, R1, R2, \text{OutABC} \} \quad (6.1)$$

$$p_A = \{ s_A(0), s_A(1), s_A(2) \} \quad (6.2)$$

Produto B:

$$r^*_B = \{ \text{InBD}, R2, R1, \text{OutABC} \} \quad (6.3)$$

$$p_B = \{ s_B(0), s_B(1), s_B(2) \} \quad (6.4)$$

Produto C:

$$r^*_C = \{ \text{InCE}, R6, R3, R2, \text{OutABC} \} \quad (6.5)$$

$$p_C = \{ s_C(0), s_C(1), s_C(2), s_C(3) \} \quad (6.6)$$

Produto D:

$$r^*_D = \{ \text{InBD}, R3, R5, \text{OutDF} \} \quad (6.7)$$

$$p_D = \{ s_D(0), s_D(1), s_D(2) \} \quad (6.8)$$

Produto E:

$$r^*_E = \{ \text{InCE}, R5, R6, \text{OutEG} \} \quad (6.9)$$

$$p_E = \{ s_E(0), s_E(1), s_E(2) \} \quad (6.10)$$

Produto F:

$$r^*_F = \{ \text{InAFG}, R4, R3, \text{OutDF} \} \quad (6.11)$$

$$p_F = \{ s_F(0), s_F(1), s_F(2) \} \quad (6.12)$$

Produto G:

$$r^*_G = \{ \text{InAFG}, R1, R4, \text{OutEG} \} \quad (6.13)$$

$$p_G = \{ s_G(0), s_G(1), s_G(2) \} \quad (6.14)$$

6.1.2 Arquitetura Lógica de Controle

Nesta etapa objetiva-se definir o modelo estrutural do SCDC para o SP do caso em estudo.

O diagrama de classes da Figura 6.2 apresenta os elementos que compõem o SP.

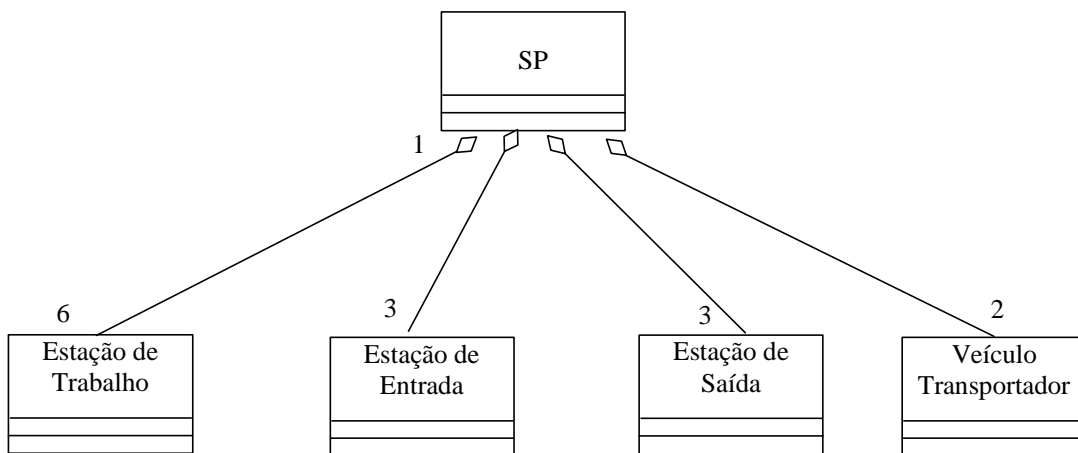


Figura 6.2. Classes de elementos do SP.

Os domínios de problemas encontrados neste SP são:

- controle de processos;
- controle de recursos de transformação;
- controle de recursos de transporte.

Definem-se então as classes de sistemas de controle, como apresentado na Figura 6.3.

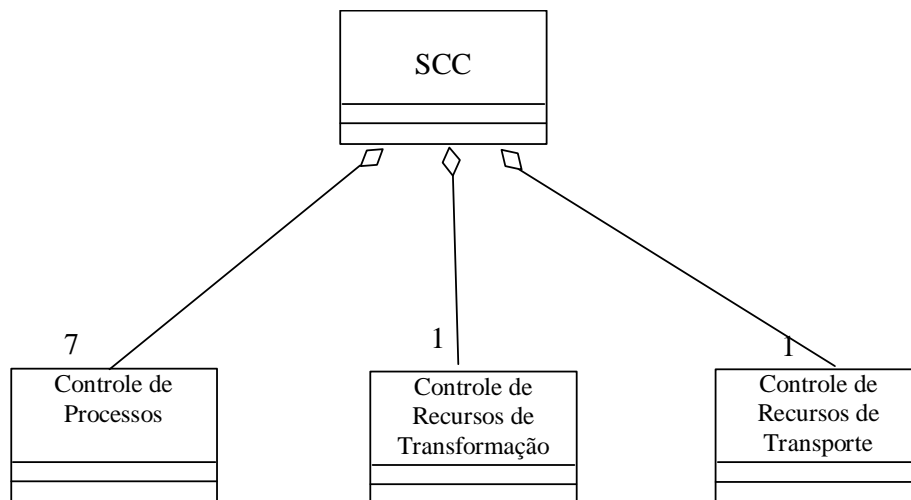


Figura 6.3. Classes de Sistemas de Controle do SCDC.

A Figura 6.4 apresenta um esquema do modelo estrutural do SCDC. Nela observam-se todos os sistemas de controle (representadas pelas elipses), dentro de seus respectivos domínios, e as interações entre os sistemas de controle. Observa-se também a organização hierárquica dos sistemas de controle.

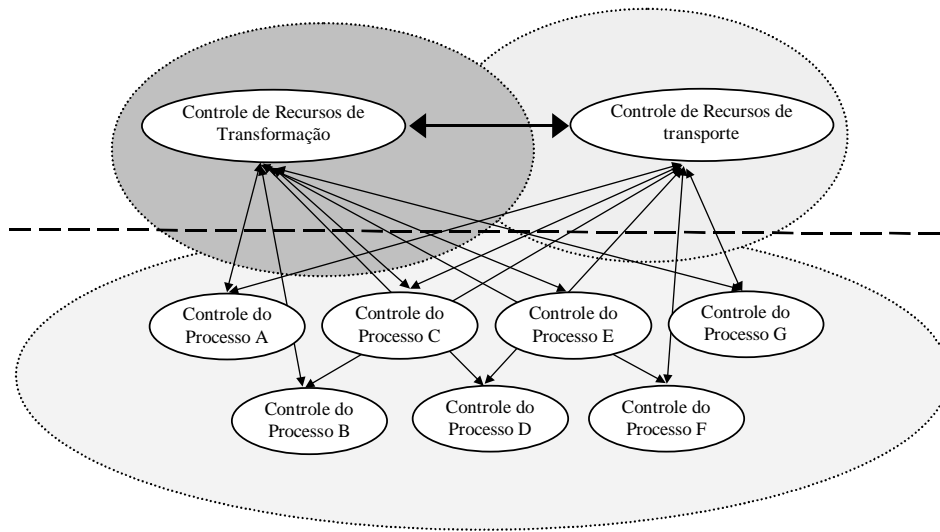


Figura 6.4. Esquema estrutural do SCDC.

6.1.3 Modelagem do Controle de Processos

Aplica-se a metodologia de modelagem estruturada PFS/E-MFG com comunicadores.

I. Identificação dos Processos Produtivos

Os processos produtivos são identificados e representados em PFS num nível mais alto de abstração: um processo produtivo para cada item do conjunto de produtos Q da expressão (6.0). A Figura 6.5 ilustra esses modelos dos processos produtivos em PFS.

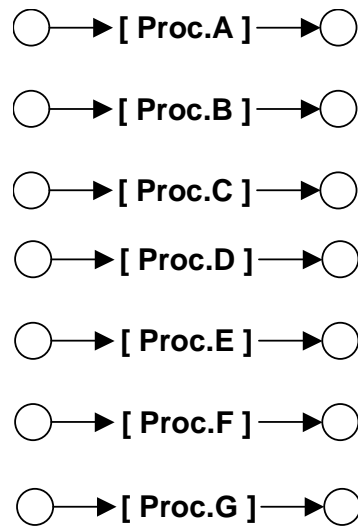


Figura 6.5 Modelo PFS dos processos produtivos.

II. Detalhamento dos Processos em PFS

Refinam-se os modelos PFS da Figura 6.5, identificando as atividades que representam as etapas do processo produtivo e descrevendo a lógica de precedência destas atividades. A Figura 6.6 ilustra esses modelos detalhados em PFS.

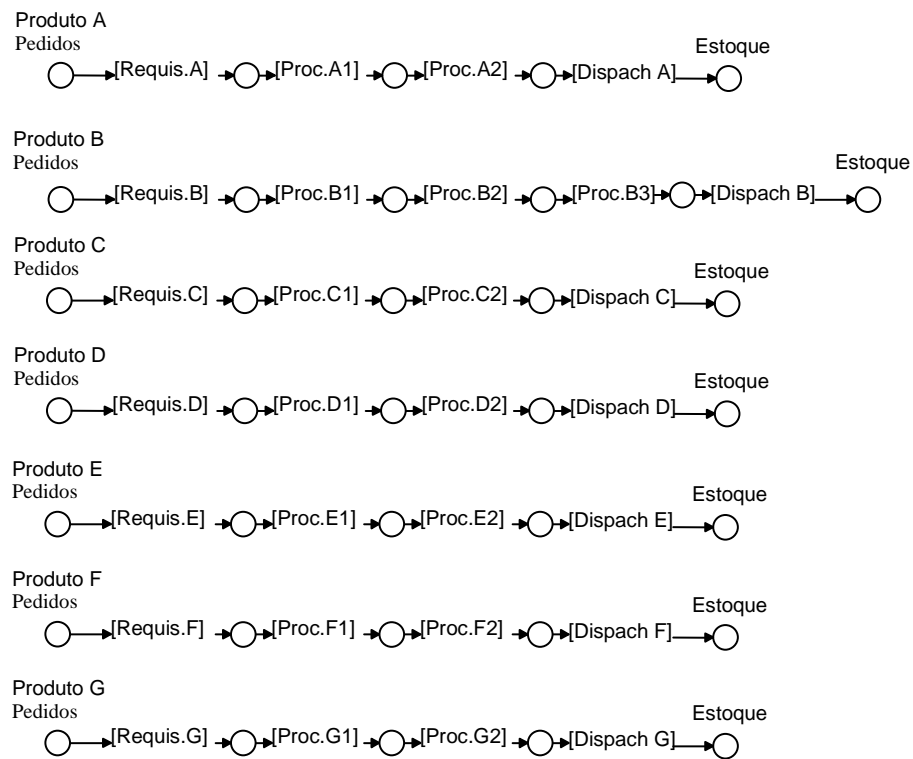


Figura 6.6. Modelos detalhados em PFS dos processos produtivos.

Nestes modelos observam-se três tipos básicos de atividades que compõem cada processo produtivo:

A atividade de requisição de um item para ser processado, de acordo com a ordem de serviço prescrita ou o pedido prescrito (atividade “/RequisX”).

A atividade de despacho que libera o produto pronto ou atendido (atividade “/DispachX”).

A atividade de processamento de cada etapa do processo produtivo a ser executada em cada recurso específico (atividade “/ProcX”)

III. Definição dos Atributos das Marcas no E-MFG

A partir dos modelos PFS da Figura 6.6 obtém-se os modelos E-MFG dos processos produtivos, sendo necessário nesse momento a definição do conjunto de atributos das marcas.

Uma marca individual possui o seguinte conjunto de atributos:

$$\text{Marca} = (a, b, c, d) \quad (6.15)$$

Onde:

a : atributo que identifica o produto;

b : atributo que identifica o pedido;

c : atributo que indica a próxima estação;

d: atributo que indica o VT.

Os valores dos atributos são definidos conforme a Figura 6.7.

a (produto)	b (pedido)	c (destino)	d (VT)
IF produtoA THEN a=A	IF pedido1 THEN b=1	IF estação R1 THEN c=1	IF VT1 THEN d=1
IF produtoB THEN a=B	IF pedido2 THEN b=2	IF estação R2 THEN c=2	IF VT2 THEN d=2
IF produtoC THEN a=C	...	IF estação R3 THEN c=3	
...	...	IF estação R4 THEN c=4	
...		IF estação R5 THEN c=5	
		...	

Figura 6.7 Exemplos de definição dos atributos das marcas individuais.

IV. Detalhamento das Atividades em E-MFG

As atividades que constituem os processos produtivos são descritas detalhadamente através dos modelos E-MFG.

O modelo detalhado genérico de uma atividade de requisição pode ser observado na Figura 6.8.

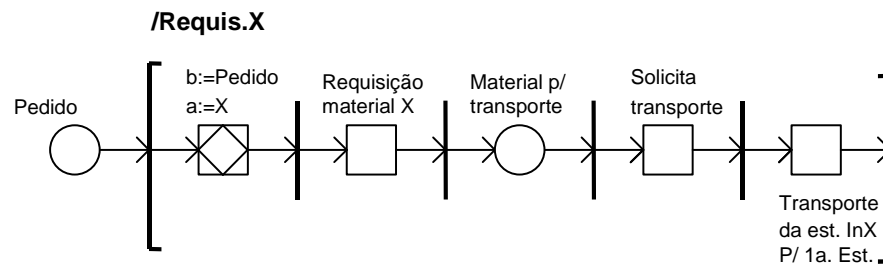


Figura 6.8 Modelo genérico da atividade “Requis.X”

O modelo detalhado genérico de uma atividade de processamento é apresentado na Figura 6.9.

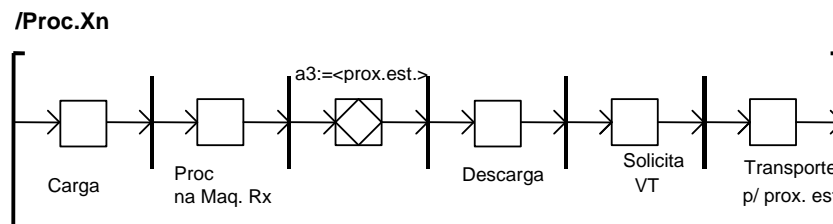


Figura 6.9 Exemplo de modelo da atividade de processamento “Proc.Xn”

O modelo genérico da atividade de despacho é conforme ilustrado na Figura 6.10.

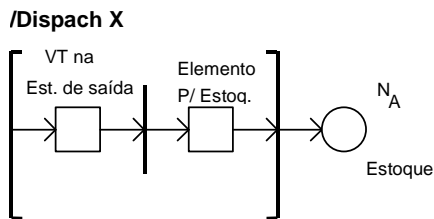


Figura 6.10 Modelo genérico da atividade “*Dispatch.X*”

Apesar dos modelos das atividades que constituem cada um dos processos não terem sido apresentados individualmente, para obtê-los basta instanciar os modelos genéricos apresentados para cada caso, pois os elementos estruturais dos modelos são exatamente os mesmos, diferindo apenas a interpretação.

Assim, definem-se desta forma os modelos E-MFG dos processos, observando-se que os elementos distribuidores que conectam as atividades que constituem cada processo podem ser traduzidos por boxes simples no modelo E-MFG detalhado.

V. Mapeamento das Mensagens de Comunicação

Os eventos gerados pelo controle de processos produtivos devem ser enviados para o objeto de controle através das interfaces de envio. Por sua vez, os eventos ocorridos no objeto de controle devem ser enviados ao controle de processos produtivos através das interfaces de recepção. Além desta interação com o objeto de controle, o sistema de controle de processos interage com os sistemas de controle situados no nível hierárquico superior para requisitar os recursos necessários na realização das etapas do processo produtivo.

A Figura 6.11 ilustra este procedimento para uma das atividades genéricas. O modelo do processamento “*Proc.Xn*” (apresentado na Figura 6.9) é acrescido das interfaces de envio e de recepção. As transições de envio *ControleRecTP.req* e *ControleRecTF.req* enviam mensagens de requisição

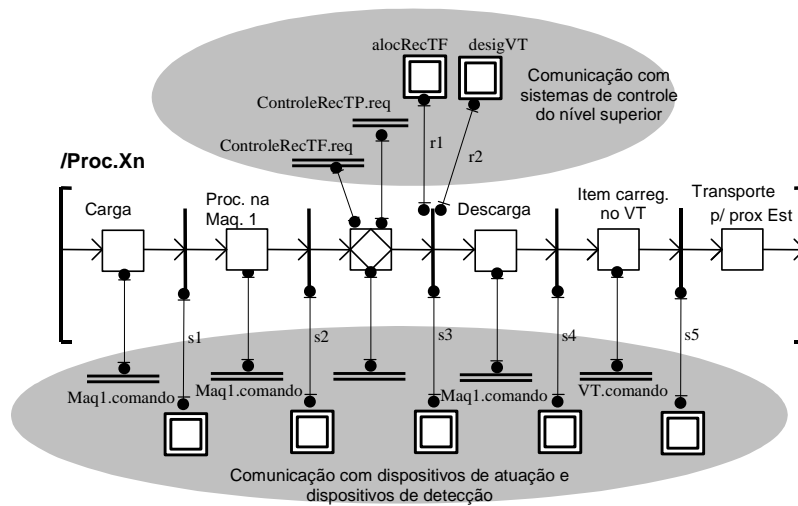


Figura 6.11 Mapeamento das mensagens de comunicação no controle de “*Proc.Xn*”.

6.1.4 Modelagem do Controle de Recursos de Transformação

Inicialmente, modelam-se os processos produtivos através do GAR, e que no nível global do SP resulta no modelo GAR da Figura 6.12. A partir do GAR de cada processo gera-se o modelo E-MFG correspondente e aplicando-se a técnica de fusão de lugares é obtido o modelo E-MFG global de uso dos recursos.

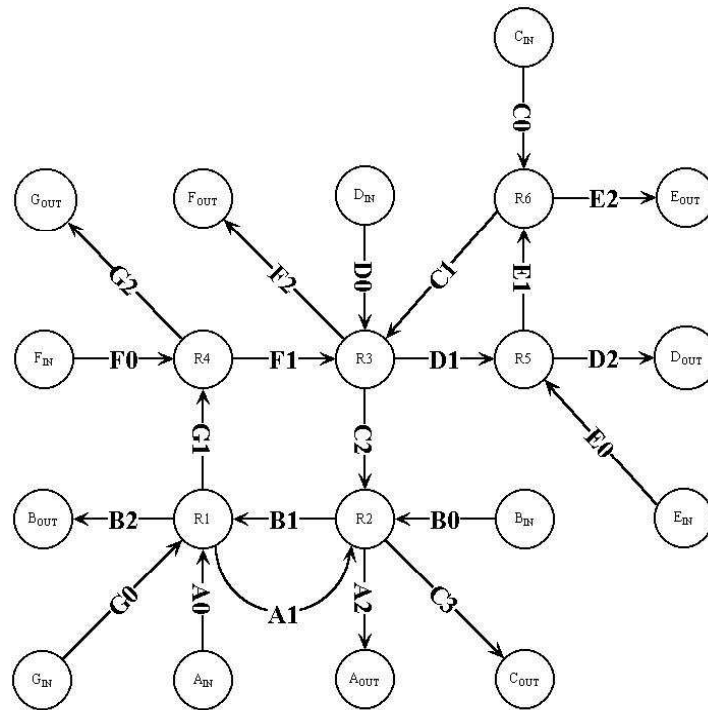


Figura 6.12. Modelo GAR global.

Aplicando-se os procedimentos descritos no capítulo 4, obtém-se as regras adicionais de controle, que estão organizados na Figura 6.13.

CFE	Regras Adicionais de Controle
E1/C1/D1	IF (R3=D) AND (R5=E) THEN C0=FALSE
	IF (R5=E) AND (R6=C) THEN D0=FALSE
	IF (R3=D) AND (R6=C) THEN E0=FALSE
F1/C2/B1/G1	IF (R1=G) AND (R2=B) AND (R3=C) THEN F0=FALSE
	IF (R1=G) AND (R2=B) AND (R4=F) THEN C1=FALSE
	IF (R1=G) AND (R3=C) AND (R4=F) THEN B0=FALSE
	IF (R2=B) AND (R3=C) AND (R4=F) THEN G0=FALSE
B1/A1	IF (R1=A) THEN B0=FALSE
	IF (R2=B) THEN A0=FALSE

Figura 6.13. Regras adicionais de controle.

Inserindo-se as regras adicionais de controle ao grafo E-MFG global na forma de arcos inibidores, obtém-se o modelo de controle E-MFG de uso dos recursos de transformação, apresentado na Figura 6.14.

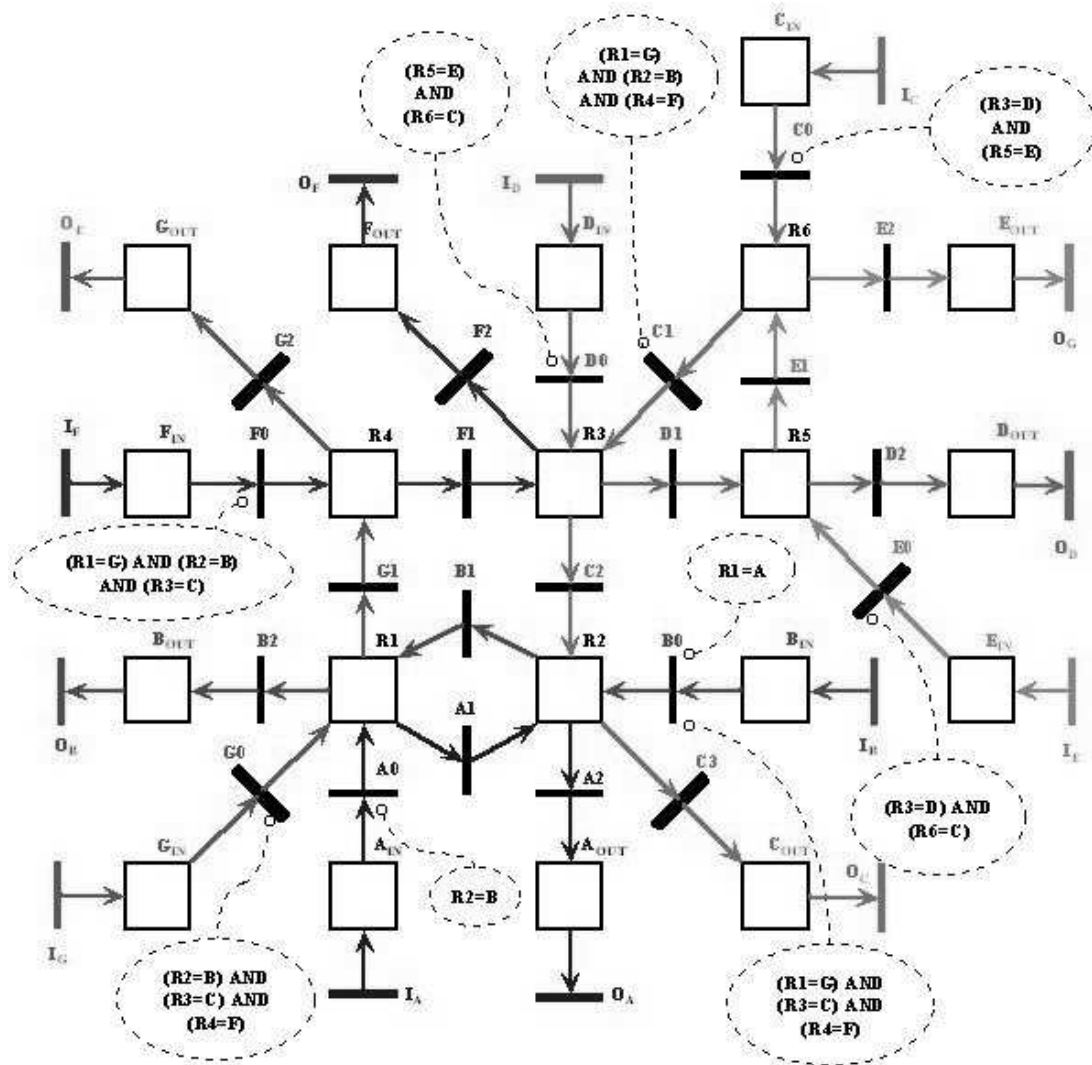


Figura 6.14. Modelo E-MFG de controle de recursos de transformação.

O fluxo de informações de controle entre os níveis de controle de processos produtivos e de controle de recursos é realizado através de interfaces de envios e interfaces de recepção de mensagens apropriadas.

A recepção das mensagens de requisição de recursos é representada pela marcação do box receptor *req* ilustrado na Figura 6.15, cujos arcos de recepção estão conectados a cada uma das transições do grafo E-MFG da Figura 6.14. O conjunto de atributos da marca do box receptor é definido de acordo com a expressão (6.16). O direcionador contém regras que definem o sinal dos arcos de recepção em função dos atributos das marcas do box receptor, conforme a Figura 6.16.

$$\text{Marca do box receptor} = (a1, a2, a3) \quad (6.16)$$

Onde:

a1 : identifica o item;

a2 : identifica a etapa do processo produtivo do item;

a3 : identifica o recurso a ser requisitado para a próxima etapa.

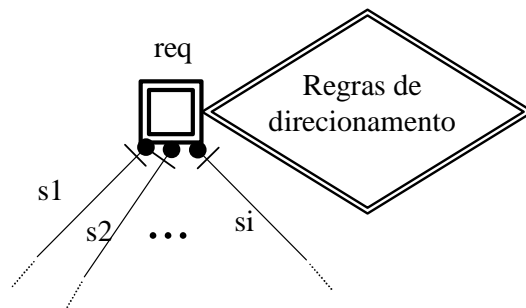


Figura 6.15. Box receptor de mensagens de requisição de recursos.

a1 (produto)	a2 (etapa)	a3 (próximo recurso)	Arco com sinal = "1" (os demais têm sinal = "0")
A	$s_A(0)$	R1	s1
A	$s_A(1)$	R2	s2
A	$s_A(2)$	Out1	s3
B	$s_B(0)$	R2	s4
B	$s_B(1)$	R1	s5
...
...

Figura 6.16. Exemplos de definição dos sinais dos arcos através do direcionador.

6.1.5 Modelagem do Controle de Recursos de Transporte

O controle de recursos de transporte neste caso consiste na designação de veículos para atender as requisições de transporte que ocorrem no decorrer dos processos produtivos.

Sendo dois o número de transportadores (VT), o SP será particionado em duas regiões. Para determinar as regiões, inicialmente determina-se a referência global CVDG, considerando-se a demanda por transporte de cada estação e as posições geográficas de cada estação no SP, aplicando-se a expressão (4.6). Para isto convém organizar os dados numa tabela como por exemplo a ilustrada na Figura 6.17 .

i	Estação E_i	Posição x	Posição y	Demanda
1	R1	100	200	30
2	R2	400	200	20
3	R3	400	400	30
...

Figura 6.17. Estações, suas posições e demandas por transporte.

Estima-se o volume médio de trabalho de transporte por região (ITT_{MR}) aplicando as expressões (4.8) e (4.9). E então, aplicando-se os passos a) a e) para o particionamento do SP, definem-se as regiões.

Finalmente definem-se os pontos de estacionamento dentro de cada região através da expressão (4.12)

Assim, o SP fica organizado em duas regiões, com os respectivos pontos estratégicos, ilustrados na Figura 6.18, e os VT movimentam-se conforme a dinâmica de atendimento das requisições estabelecida pelos algoritmos das Figuras C.1 e C.2.

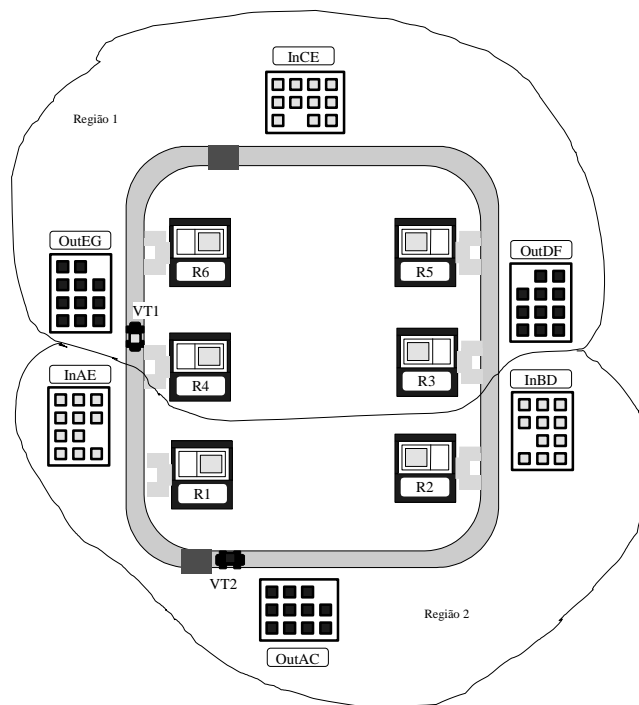


Figura 6.18. Regiões resultantes do particionamento.

6.1.6 Modelagem do comportamento colaborativo

Esta etapa descreve a seqüência de mensagens entre os sistemas de controle, que representa uma situação colaborativa, isto é, situações em que para tomada de decisões de um domínio são necessárias algumas informações pertinentes a outros domínios.

Um exemplo de colaboração neste caso ilustra uma situação onde o sistema de controle de recursos de transformação deve resolver um conflito entre duas requisições. Considerando-se duas requisições para o mesmo recurso R2, originadas de processos diferentes, processo A e processo B, e considerando-se que as regras adicionais não se aplicam (isto é, o sistema não está em estado anterior ao “deadlock”) e as pré-condições e

as pós condições se verificam, então as transições correspondentes às requisições estão em conflito, isto é, o disparo de uma das transições irá alocar o recurso exclusivamente ao processo correspondente. Adotando-se regras de prioridades como forma de resolver o conflito, escolhe-se o processo cujo tempo estimado de transporte seja o menor.

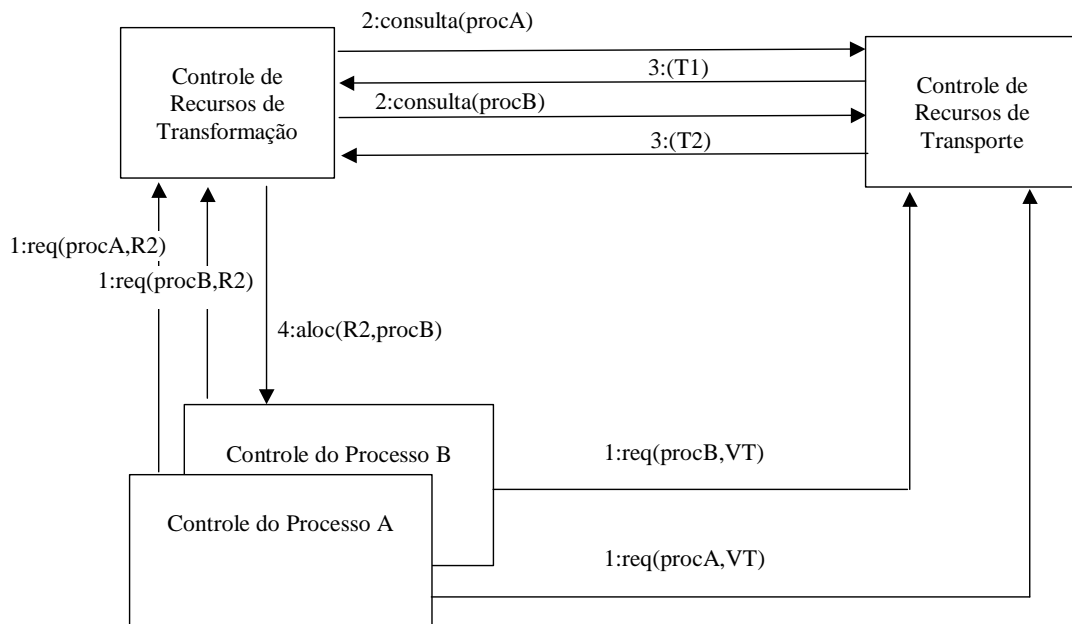


Figura 6.19. Diagrama de interação.

Seguindo o procedimento do capítulo 4, identifica-se o fluxo de informação de interesse, que está representado através das mensagens do diagrama de interação da Figura 6.19. A seqüência de mensagens que ocorre durante a interação está representada no diagrama de seqüências da Figura 6.20. Observando as mensagens do diagrama de interação, identificam-se por exemplo as seguintes categorias de informação:

- Uso do recurso: {processo requisitante, recurso requisitado};
- Consulta : {requisição, estimativa de atendimento}

As informações de uso dos recursos são enviadas dentro das mensagens tipo 1 da Figura 6.19, por exemplo a mensagem 1:req(procA,R2).

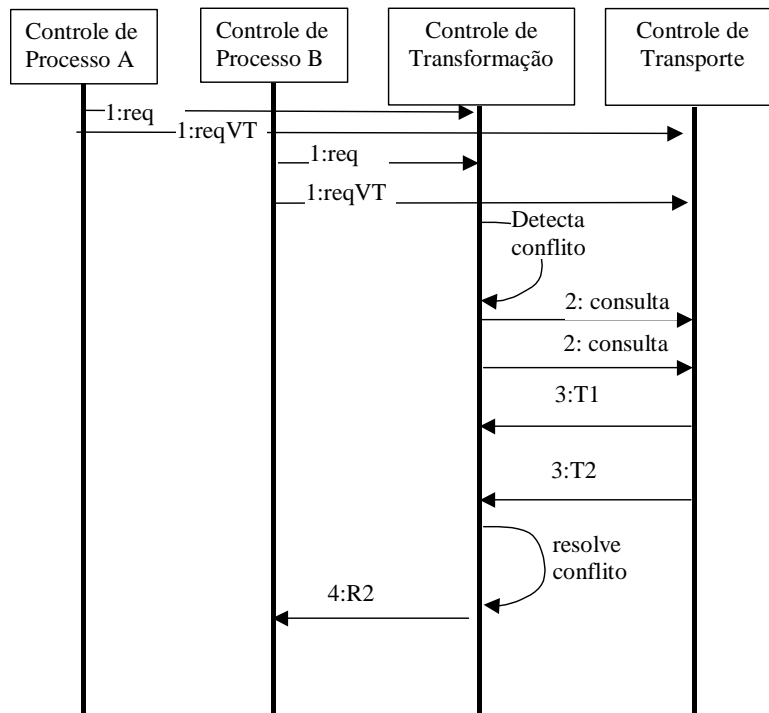


Figura 6.20. Diagrama de Seqüência

As categorias de informações podem ser representadas através de classes como no diagrama de classes da Figura 6.21.

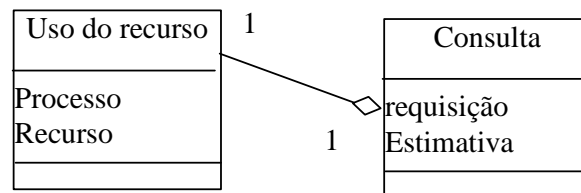


Figura 6.21. Diagrama de classes de informação.

6.2 Caso 2

6.2.1 Descrição do Caso 2

Este exemplo ilustra a aplicação da modelagem de SCDC de um SP composto por unidades produtivas. O SP a ser tratado é um sistema flexível de manufatura, capaz de realizar simultaneamente diversos processos produtivos através das estações de trabalho. O fluxo de materiais é realizado por um sistema de transporte baseado em veículos de transporte autônomos (VT). Este exemplo baseia-se no modelo apresentado por Park et al.(2002), adaptado para o caso de se ter um único conjunto de veículos atendendo as requisições de transporte tanto internas às unidades produtivas como as requisições entre elas.

O SP em estudo é composto pelos seguintes elementos (Figura 6.22):

Quatro unidades produtivas: UP1, UP2, UP3, UP4 ;

N veículos transportadores: VT1, ... VTn.

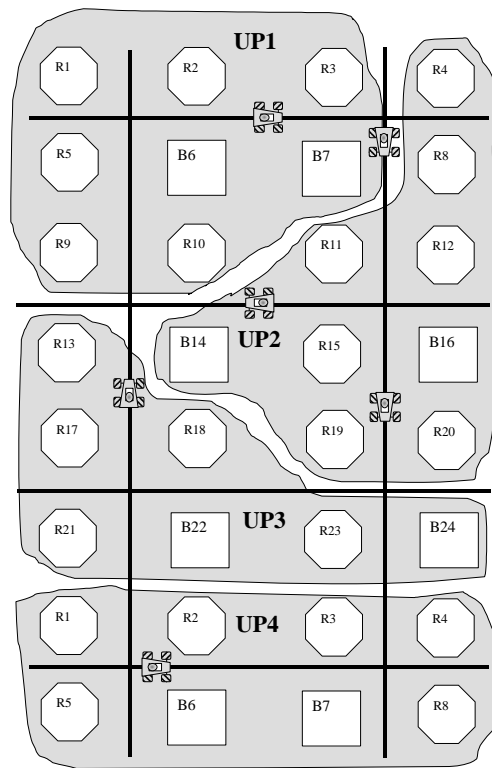


Figura 6.22. Esquema do SP do caso 2.

Neste sistema são processados três tipos de itens:

$$Q = \{ A, B, C \} \quad (6.17)$$

Cada um destes produtos possui uma rota r^*_q determinada que representa uma seqüência de UP a serem visitadas para a realização de seus processos produtivos, de acordo com as seguintes descrições:

Produto A:

$$r^*_A = \{ UP1, UP2, UP3 \} \quad (6.18)$$

$$p_A = \{ s_A(1), s_A(2), s_A(3) \} \quad (6.19)$$

onde $s_A(1)$ =processo A1, $s_A(2)$ =processo A2 e $s_A(3)$ =processo A3.

Produto B:

$$r^*_B = \{ UP2, UP4, UP3 \} \quad (6.20)$$

$$p_B = \{ s_B(1), s_B(2), s_B(3) \} \quad (6.21)$$

onde $s_B(1)$ = processo B1, $s_B(2)$ =processo B2 e $s_B(3)$ =processo B3.

Produto C:

$$r^*_C = \{ UP3, UP1 \} \quad (6.22)$$

$$p_C = \{ s_C(1), s_C(2) \} \quad (6.23)$$

onde $s_C(1)$ = processo C1, $s_C(2)$ =processo C2.

6.2.2 Arquitetura de Controle

Os elementos que compõem o SP são as unidades produtivas, unidades de entrada e de saída e os veículos autônomos (Figura 6.23a). Uma unidade produtiva é composta por várias estações de trabalho (Figura 6.23b).

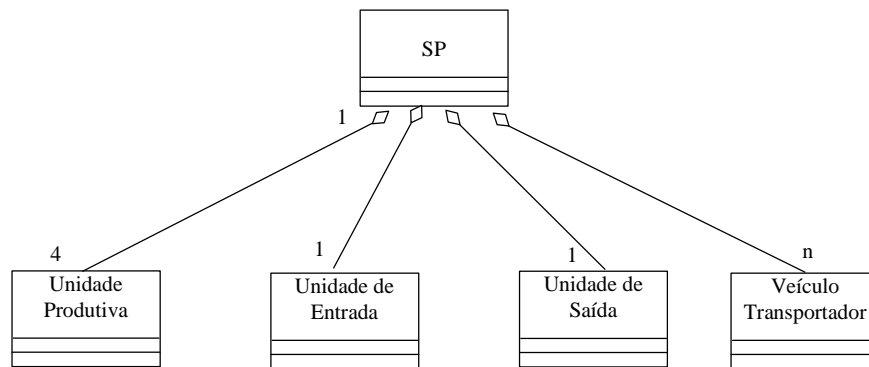


Figura 6.23a. Elementos do SP.

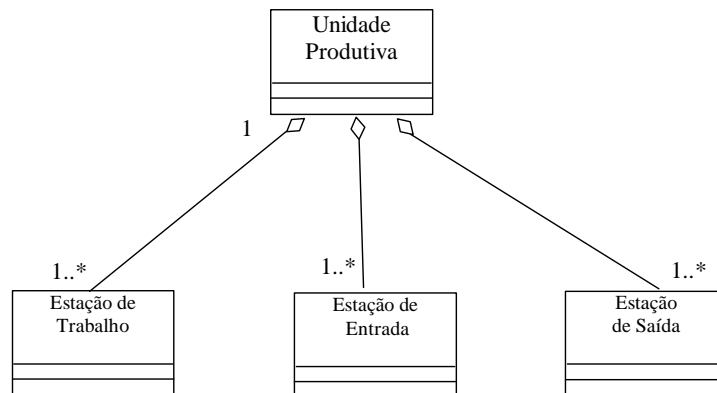


Figura 6.23b. Composição de uma unidade produtiva.

Os domínios identificados são o controle de processos produtivos, o controle de recursos de transformação e o controle de recursos de transporte, sendo que o controle de recursos de transporte deve tratar o problema da designação de veículos e também o problema do fluxo de itens entre as unidades produtivas. A Figura 6.24 apresenta as classes de controle que compõem o SCDC e a Figura 6.25 apresenta o esquema estrutural do SCDC, organizado em níveis hierárquicos.

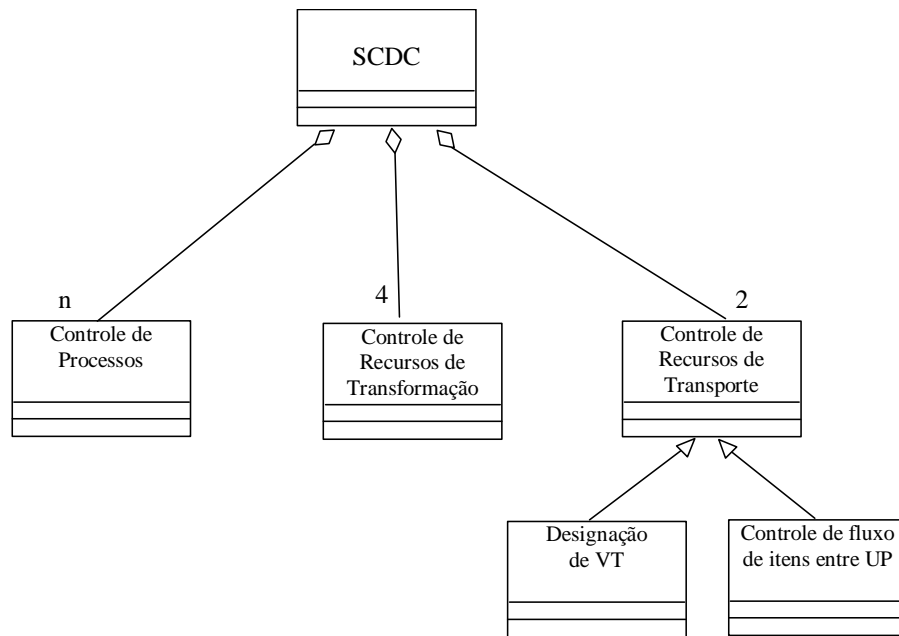


Figura 6.24. Modelo estrutural do SCDC.

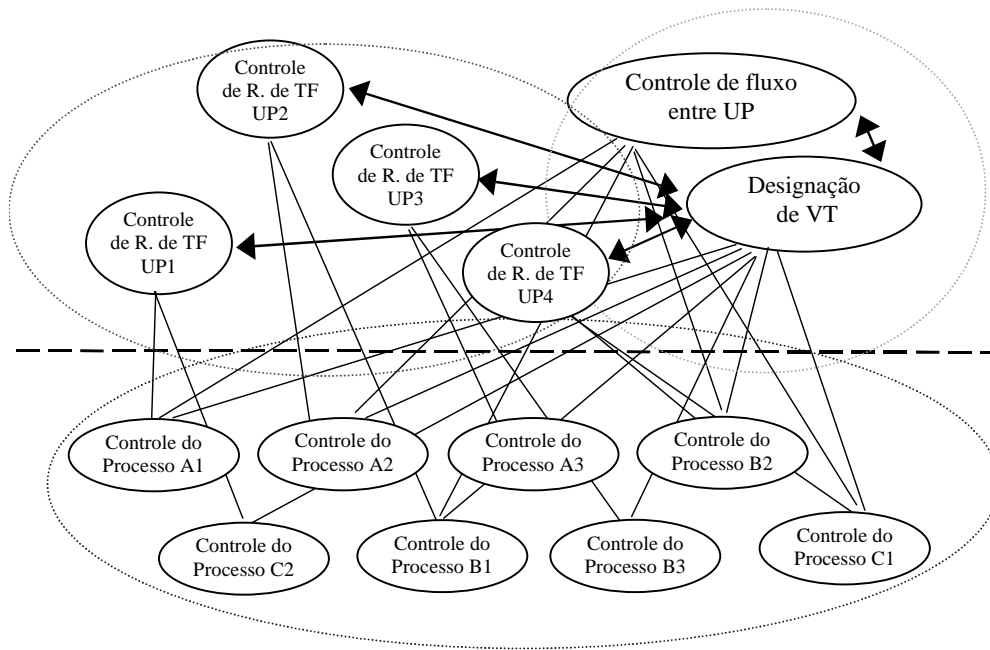


Figura.6.25. Esquema estrutural do SCDC.

Para cada unidade produtiva existe um controle de recursos de transformação responsável pelo gerenciamento do uso dos recursos de transformação segundo a estratégia de controle de “deadlock-avoidance”. O algoritmo de controle neste caso é análogo ao correspondente do caso 1. Assim como o controle de designação de VT é o análogo ao correspondente no caso 1, apenas atentando que os procedimentos de particionamento em regiões e de determinação dos pontos estratégicos devem ser aplicados ao SP como um todo. Portanto, a modelagem destes sistemas de controle não será detalhada neste texto; no entanto, ela deve ser parte integrante considerando-se a especificação completa do SCDC.

6.2.3 Modelagem do Controle de Fluxo Entre Unidades Produtivas

Inicialmente, obtém-se os modelos de ocupação das UP para cada produto, para isso modela-se cada uma das rotas utilizando GAR (Figura 6.26) e os respectivos modelos E-MFG. Através da técnica baseada na fusão de lugares, obtém-se o modelo E-MFG global de ocupação das UP (Figura 6.27), cujo correspondente em GAR está ilustrado na Figura 6.28.

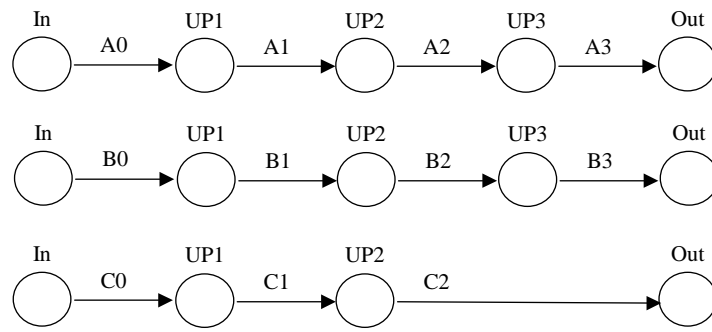


Figura 6.26. Modelos GAR das rotas de cada produto.

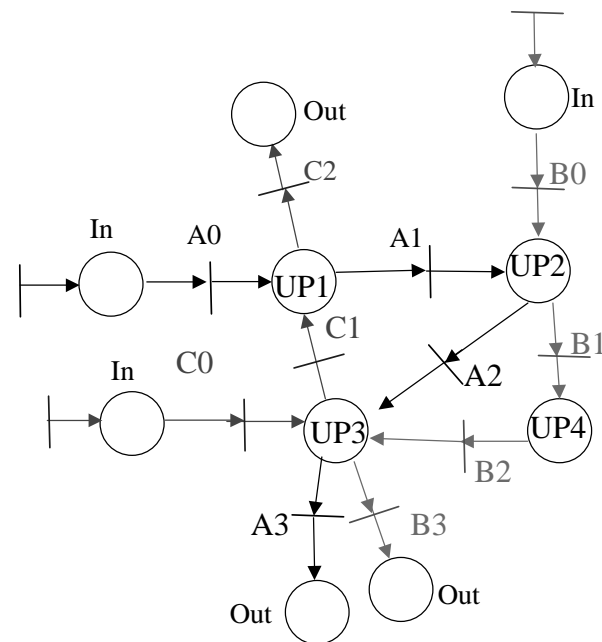


Figura 6.27. Modelo E-MFG global de ocupação das UP.

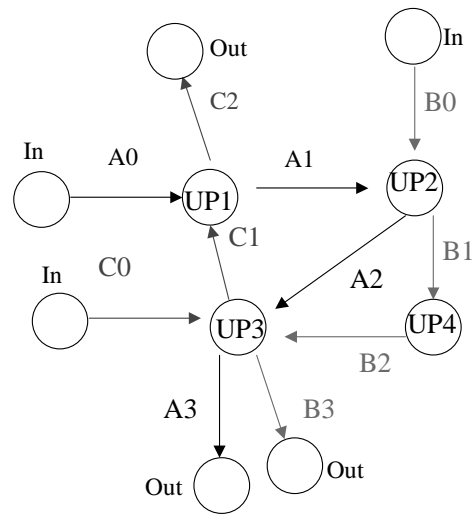


Figura 6.28. Modelo GAR global de ocupação das UP.

São identificados dois CFE:

$$CFE1 = \{ (UP1,A1), (UP2,A2), (UP3,C1) \}$$

$$CFE2 = \{ (UP1,A1), (UP2,B1), (UP4,B2), (UP3,C1) \}$$

A Figura 6.29 e a Figura 6.30 ilustram respectivamente o CFE1 e CFE2 juntamente com os arcos de entrada no ciclo.

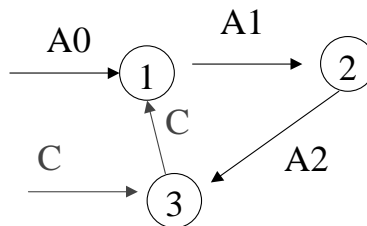


Figura 6.29. CFE1

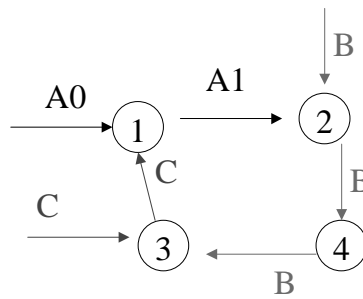


Figura 6.30. CFE2

No CFE1, o estado anterior ao deadlock é aquela onde a soma da ocupação de UP1 pelo item A, com a ocupação de UP2 pelo item A, e com a ocupação de UP3 pelo item C, resulta na capacidade total das UP do ciclo menos um. Isto é, aplicando-se a expressão 4.5, a condição para detecção do estado anterior ao “deadlock” é:

$$(\text{cap}(\text{UP1}) + \text{cap}(\text{UP2}) + \text{cap}(\text{UP3})) - (m_A(\text{UP1}) + m_A(\text{UP2}) + m_C(\text{UP3})) = 1$$

Analogamente, no CFE2 a condição para detecção do estado anterior ao “deadlock” é:

$$(\text{cap}(\text{UP1}) + \text{cap}(\text{UP2}) + \text{cap}(\text{UP3}) + \text{cap}(\text{UP4})) - (m_A(\text{UP1}) + m_B(\text{UP2}) + m_B(\text{UP4}) + m_C(\text{UP3})) = 1$$

Obtém-se então as duas regras adicionais de controle, que devem ser adicionadas ao grafo da Figura 6.27:

- Regra 1: IF $[(\text{cap}(\text{UP1}) + \text{cap}(\text{UP2}) + \text{cap}(\text{UP3})) - (m_A(\text{UP1}) + m_A(\text{UP2}) + m_C(\text{UP3})) = 1]$ THEN [desabilitar C0 e A0]
- Regra 2: IF $[(\text{cap}(\text{UP1}) + \text{cap}(\text{UP2}) + \text{cap}(\text{UP3}) + \text{cap}(\text{UP4})) - (m_A(\text{UP1}) + m_B(\text{UP2}) + m_B(\text{UP4}) + m_C(\text{UP3})) = 1]$ THEN [desabilitar C0 e A0 e B0]

Mapeando-se os elementos comunicadores, finalmente obtém-se o modelo de controle de fluxo entre unidades produtivas ilustrado na Figura 6.31.

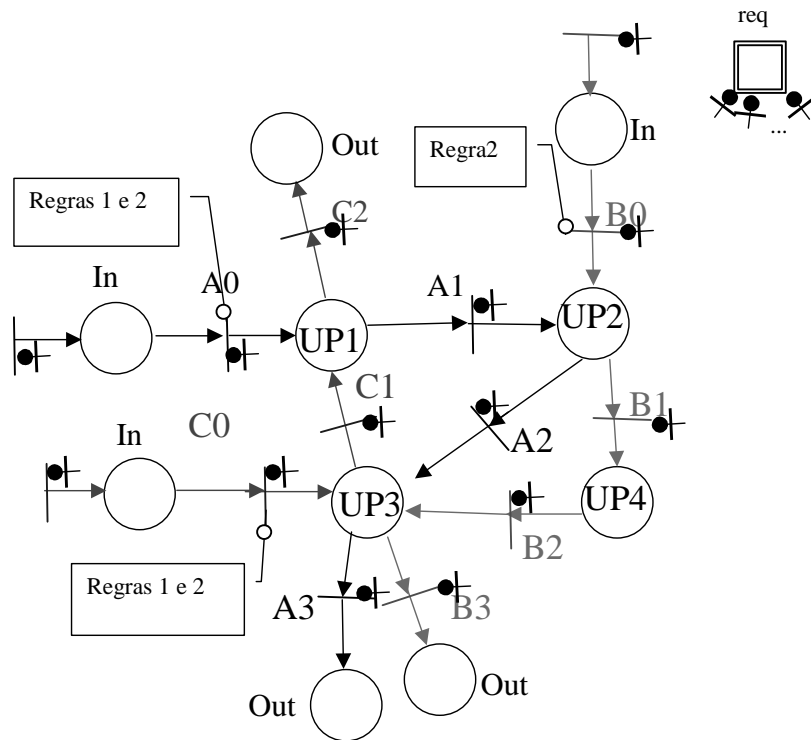


Figura 6.31. Modelo E-MFG com comunicadores do controle de fluxo entre UP.

6.2.4 Comportamento Colaborativo

Neste exemplo será apresentado o modelo somente da comunicação entre o controle de processos produtivos e o controle de transporte, pois as demais interações são análogas às interações identificadas do exemplo do Caso 1.

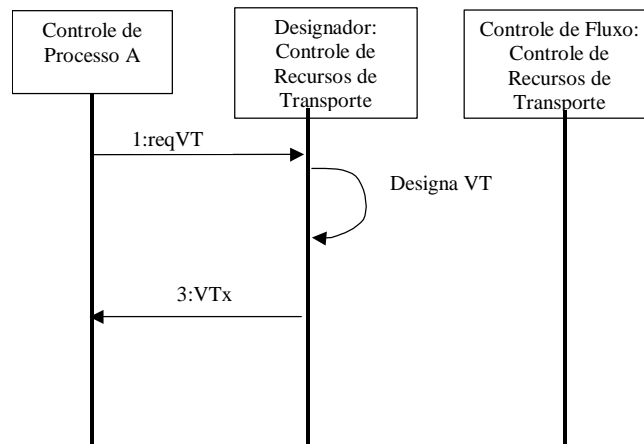


Figura 6.32. Diagrama de seqüência, para o caso de requisição de veículo para transporte dentro de uma unidade produtiva.

A interação entre o controle de processos e o controle de recursos de transporte continua sendo de requisição de veículo e a designação do veículo. A seqüência de mensagens é definida como segue: o controle do processo produtivo requisita um transportador VTx para o item A, que acabou de ser processado na etapa $s_A(1)$; então o designador de veículos designa um VT e comunica ao controle de processos (Figura 6.32). No entanto, dependendo de se a etapa requisitante é a última do processo (etapa terminal) dentro da Unidade Produtiva, e portanto uma situação em que o item deve seguir para a próxima unidade produtiva, o controle de fluxo de itens entre UP deve ser consultado antes da designação do veículo (Figura 6.33).

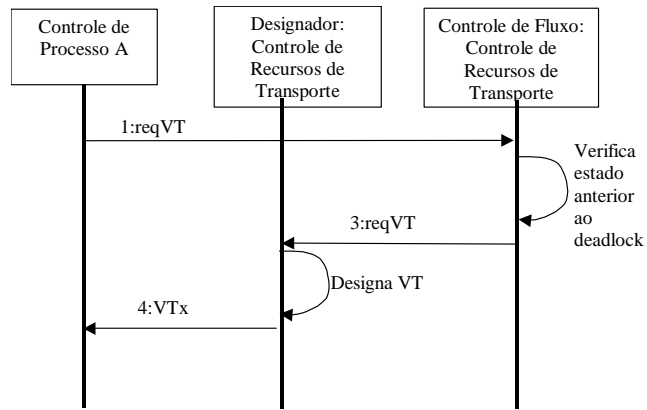


Figura 6.33. Diagrama de seqüência, para o caso de requisição de veículo para transporte entre unidades produtivas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho contribui nos aspectos relacionados à modelagem do controle de Sistemas Produtivos (SP), atuando nos seguintes sentidos:

- Revisão da composição dos SP, abordando de forma integrada aspectos de naturezas diferentes, para decomposição do sistema de controle de SP em múltiplas faces (semântica, funcional, temporal e espacial);
- Definição da arquitetura lógica de controle dos sistemas de controle distribuídos e colaborativos (SCDC), que contemple as diferentes semânticas num SP e que permite o tratamento da complexidade do processo global destes sistemas.
- Definição de técnicas e procedimentos para a modelagem de sistemas de controle para SP, considerando-se as múltiplas habilidades necessárias para a execução das estratégias de controle.
- Definição do procedimento de modelagem da cooperação entre sistemas de controle de domínios diferentes para que trabalhem de forma colaborativa.

Como principais resultados obtidos tem-se:

- Procedimento de identificação das semânticas, de acordo com os domínios de problemas de controle, considerando-se as especificidades dos elementos constituintes do SP, isto é, a identificação das semânticas baseada nas classes de recursos do SP.
- Proposta da arquitetura lógica de controle para SCDC, no qual as classes de sistemas de controle refletem as múltiplas faces de decomposição. Os sistemas de controle compõem a arquitetura hierárquica-modificada, em cujo nível superior (dos processos globais) existe comunicação intra-nível.
- Proposta de uma extensão ao E-MFG para que incorpore os elementos comunicadores necessários ao novo contexto, e uma adequação na metodologia PFS/E-MFG estruturada de modelagem de controle de processos produtivos para que suportem a interação através de comunicação.
- Generalização do método de geração de regras adicionais de controle, considerando-se recursos com capacidade múltipla.
- Proposta de abordar o controle de fluxo entre unidades produtivas como sendo um problema de transporte, alocando no domínio de transporte o sistema de controle de recursos de transporte. Desta forma, permite-se que os domínios semânticos que definem a arquitetura sejam mantidos mesmo que os níveis de agrupamentos de unidades produtivas aumentem progressivamente.

- Proposta de procedimentos de modelagem da comunicação entre os sistemas de controle, aplicando-se procedimentos de modelagem de fluxos de informação.
- Sistemática para modelagem de SCDC de SP.

Como considerações finais observa-se que este trabalho é uma proposta inicial de como os múltiplos objetivos de controle de SP podem ser abordados através de SCDC, e que existem vários aspectos interessantes investigados em futuros trabalhos. Alguns desses são: modelagem das interfaces de comunicação e suas correspondentes representações em blocos funcionais (FB) da IEC 61499; modelagem orientada a FB dos sistemas de controle; estudo da relação entre o SCDC e a informação que permeia o SCDC, isto é, estudar os pontos de identificação entre métodos aplicados a sistemas de informação e o projeto de soluções de sistemas de controle de SP; estudo de técnicas específicas para sistemas de controle que atendam a determinado objetivo de controle (por exemplo, objetivos relacionados ao desempenho, à tolerância a falhas, entre outros); arquiteturas de software e arquiteturas de hardware que suportam os SCDC, observando-se a especificação do controle orientada a FB; aplicação da sistemática de modelagem de SCDC em diferentes SP; aprimoramento da proposta atual de sistemática de modelagem de SCDC; desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem no processo de especificação de SCDC, baseada na sistemática e na modelagem orientada a FB.

ANEXO A

MARK FLOW GRAPH (MFG), ENHANCED MARK FLOW GRAPH (E-MFG) E PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS)

Neste Anexo apresenta-se um conjunto de técnicas de modelagem de sistemas baseado no MFG -Mark Flow Graph - (HASEGAWA & TAKAHASHI, 1982), E-MFG - Enhanced Mark Flow Graph - (SANTOS FILHO; MIYAGI, 1995) e PFS - Production Flow Schema - (MIYAGI, 1996).

A.1 Fundamentos do Mark Flow Graph (MFG)

O MFG (HASEGAWA & TAKAHASHI, 1982), (MIYAGI, 1996) é uma rede interpretada derivada de redes de Petri (PETERSON, 1981), (REISIG, 1985), (REISIG, 1992) desenvolvida para a modelagem e controle de sistemas. O MFG é composto basicamente pelos seguintes elementos estruturais (vide Figura A.1):

- a) As transições que indicam a ocorrência de eventos;
- b) Os boxes que representam as pré e pós-condições;
- c) Os arcos orientados que estabelecem uma relação causal entre os eventos e as condições;
- d) As portas que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos e;
- e) As marcas que indicam a manutenção de uma condição.

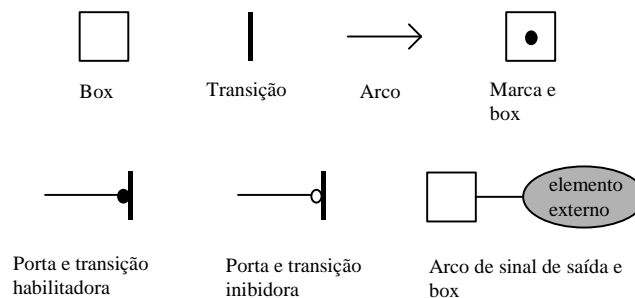


Figura A.1. Elementos básicos do MFG.

No processo de modelagem de SP, os boxes representam as condições, operações ou tarefas associadas aos dispositivos e as transições representam o início e término de um processo. O comportamento dinâmico do sistema é indicado pela evolução das marcas no grafo, de acordo com uma regra pré-definida de disparo das transições e que correspondem ao fluxo de itens (materiais ou informações) no sistema real.

Para representar o interfaceamento do modelo do sistema com o sistema real existem ainda dois elementos estruturais: os arcos de sinal de saída e as portas habilitadoras/inibidoras. No caso das portas, ainda há uma classificação em portas externas ou internas, dependendo da natureza do sinal de origem.

A.2 Mark Flow Graph Estendido (E-MFG)

O E-MFG é uma técnica de modelagem que permite a manipulação de marcas individuais com atributos, sendo capaz de modelar e controlar alterações de fluxo (rotas alternativas) das marcas e seleção de tarefas (condições) associadas aos boxes. A estrutura básica do grafo MFG e de seus principais elementos é mantida. A concepção de marcas com atributos fundamenta-se na teoria de ‘Tagged MFG’ (YOSHIDA, 1988). Neste sentido, procurou-se manter as regras básicas de manipulação dos atributos. Para a inclusão de regras adicionais de disparo das transições, o desenvolvimento do trabalho baseia-se na teoria de ϕ -net (FUJI ELETRIC, 1989). Apresenta-se a seguir os elementos estruturais fundamentais do E-MFG e a dinâmica de disparo das transições e atualização da marcação (SANTOS FILHO, 1993), (SANTOS FILHO; MIYAGI, 1995).

A.2.1 Marcas Individuais

Neste caso, os elementos estruturais básicos apresentados na Figura A.1, constituem um caso particular em que não há marcas individuais e não há regras adicionais associadas às transições. No E-MFG as marcas são acompanhadas por um vetor de atributos que lhes garantem individualidade. A estes atributos pode-se associar diversas informações referentes ao produto, ao processo e ao controle. O atributo zero, significa a ausência deste atributo. A Figura A.2 representa um exemplo de estrutura de uma marca individual.

$$\begin{array}{l} \text{Marca } \bullet = \langle a1, a2, a3, a4 \rangle \\ \text{onde, } \left\{ \begin{array}{l} a1 = \text{tipo de peça} \\ a2 = \text{encomenda} \\ a3 = \text{origem} \\ a4 = \text{destino} \end{array} \right. \end{array}$$

Figura A.2. Exemplo de estrutura de uma marca individual.

A.2.2 Marcas Individuais Compostas

No sentido de modularizar o MFG, foram propostos macro-elementos para simplificar a representação de diversos dispositivos comuns presentes no ambiente de manufatura. Assim, foi introduzido o MFG Funcional (HASEGAWA & TAKAHASHI, 1985) (MATSUSAKI, 1998) que agrega vários macro-elementos estruturais do MFG. Neste caso, os boxes funcionais do tipo capacidade, agrupador e dispersor manipulam apenas marcas indistintas, isto é, um box agrupador ou dispersor ou mesmo capacidade controlam apenas a quantidade de peças na situação em que, respectivamente, se modela, por exemplo, um processo de empacotamento, ou desempacotamento, ou ainda um ‘buffer’ de armazenamento temporário em um sistema de manufatura. No caso de utilizar-se marcas individuais nestes boxes, é possível controlar também a seqüência de entrada e saída de materiais e registrar-se o conteúdo das cargas. Quando se modela processos de agrupamento (montagem, carga, etc.) e dispersão (desmontagem, descarga, etc.) através de boxes agrupadores e dispersores em E-MFG, a marca que representa o conjunto de itens é

denominada marca individual composta. Esta denominação justifica-se pela sua estrutura que armazena a informação de cada item antes do agrupamento, ou então distribui a informação para cada item após a dispersão. Estas informações armazenadas são representadas por um atributo adicional, através de um código de controle. A Figura A.3 ilustra a representação dos boxes funcionais tipo agrupador, dispersor e capacidade e um exemplo de marca individual composta.

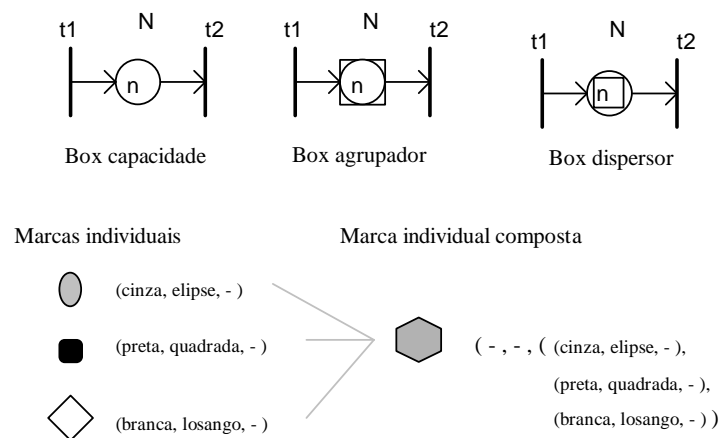


Figura A.3. Os boxes funcionais básicos e um exemplo de marca individual composta.

A.2.3 Manipulação dos Atributos das Marcas

O problema de manipulação dos atributos associados às marcas pode ser interpretado de duas maneiras. Ou podem ser modificados através de alterações condicionadas, ou através de filtragens seletivas.

A alteração condicionada significa que os estados dos atributos podem ser alterados dependendo do estado presente destes próprios atributos da marca, realizando-se desta forma a função de atualização do estado do sistema. Esta tarefa é executada por um outro box funcional denominado box controlador. Este box é assim denominado porque exerce a função de controlar o estado dos atributos de uma marca, no sentido de atualizar o estado global do sistema a partir da manutenção do estado local representado por cada uma destas marcas. Regras de produção do tipo ‘if...then...’ são aplicadas para a verificação e atualização dos atributos previamente especificados. A Figura A.4 ilustra um exemplo de box controlador alterando os atributos de uma marca.

Outra forma de alterar-se os atributos de uma marca corresponde à filtragem seletiva. Neste caso, são estabelecidos os campos correspondentes aos atributos que devem ou não acompanhar a marca, após o disparo de uma transição. Esta especificação é realizada através de inscrições nos arcos orientados. É importante observar que as inscrições não representam restrições para a habilitação da transição que possui este arco orientado do lado de entrada. Ao invés disso, representa restrições de quais campos de atributo devem ou não ser transmitidos. A Figura A.2 representa a atuação do procedimento filtragem seletiva. A inscrição variável a1 sobre o arco de entrada da transição t1 determina que apenas o atributo correspondente ao primeiro elemento do vetor de atributos que acompanha a marca individual deve ser mantido, enquanto os demais não são transmitidos.

A.2.4 Dinâmica das Regras de Disparo

A dinâmica de disparo de uma transição é estabelecida por regras de decisão segundo uma determinada hierarquia - a exemplo do que ocorre em ϕ -nets (FUJI ELETIC, 1989) - que estabelece três níveis hierárquicos de decisão.

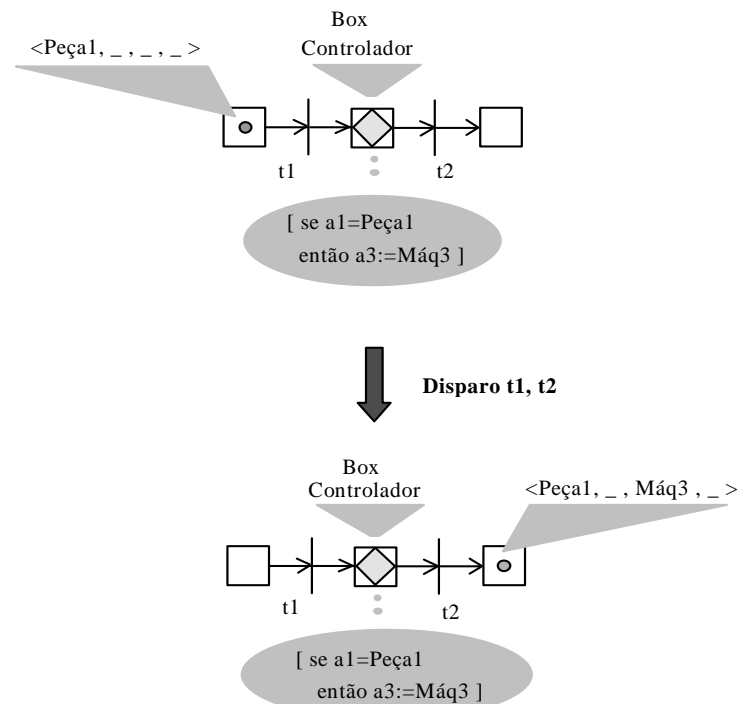


Figura A.4. Representação de um box controlador alterando o estado de uma marca individual.

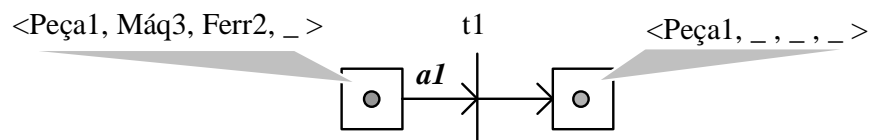


Figura A.5. Representação de um procedimento de filtragem seletiva.

O primeiro nível corresponde às regras de restrições adicionais de disparo que são regras do tipo ‘se-então’ de sistemas de produção, necessárias para a representação de estratégias de controle específicas. A especificação destas regras é realizada através de inscrições nas transições. Se não houver inscrições em uma transição, não há regras adicionais que limitem o seu disparo. Uma transição que satisfaz as regras de restrições adicionais é denominada transição em prontidão.

O segundo nível corresponde às regras de habilitação de disparo. Uma transição é denominada transição habilitada se for uma transição em prontidão que satisfaz as seguintes condições:

- a) Não existe box no lado de saída com marcas;
- b) Não existe box no lado de entrada sem marcas ou com marcas com restrições;
- c) Não existe porta habilitadora (interna ou externa) que esteja no estado de desabilitação;
- d) Não existe porta inibidora (interna ou externa) que esteja no estado de inibição.

O terceiro e último nível corresponde às regras de realização de disparo propriamente ditas. Estas regras correspondem à verificação das regras de arbitragem em situações que envolvem conflito¹ e a verificação das regras de filtragem seletiva dos atributos, de acordo com as inscrições nos arcos orientados. Uma transição habilitada que atende as regras de realização de disparo denomina-se transição disparável.

Uma transição disparável dispara imediatamente, fazendo com que as marcas fluam pelo grafo, descrevendo o comportamento dinâmico do sistema, a exemplo do que

já se realizava no MFG. A Figura A.6 ilustra um grafo E-MFG em que ocorre o disparo de uma transição e a conseqüente manipulação dos atributos das marcas envolvidas.

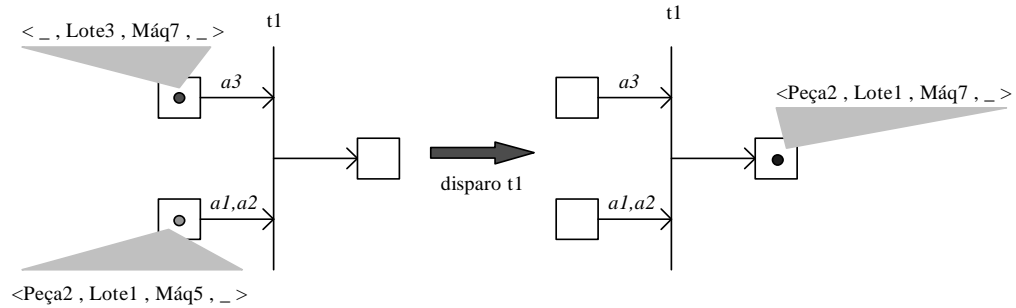


Figura A.6. Alteração dos atributos das marcas decorrentes do disparo.

A.3 Production Flow Schema (PFS) e Seus Elementos

O PFS (MIYAGI, 1996) é utilizado para descrever, graficamente e conceitualmente, os processos relacionados com a produção de itens (peças, produtos, informações, etc.) sob a forma de seqüências de etapas de atividades e de distribuição. Como indicado na Figura A.7, o PFS consiste de nós de elementos-atividade, nós de elementos distribuidores e arcos de fluxo, que conectam sequencialmente um tipo de nó ao outro.

Os elementos-atividade, como ilustrado na Figura A.8, podem ser expandidos em duas transições e um lugar (lugar-atividade). Quando é necessário a indicação do início e da conclusão de uma atividade, distingue-se a transição de entrada (como a transição de início) da transição de saída (como a transição final) (Figura A.8c). Além disso, na Figura A.8, m e n são, respectivamente, os números de entradas e saídas simultâneas de um elemento; em redes de Petri tipo lugar/transição - L/T - (REISIG, 1985), (REISIG, 1992) ou em representações híbridas, eles compõem os pesos dos arcos de fluxo. Se não houver necessidade, ou $m=n=1$, eles podem ser omitidos.

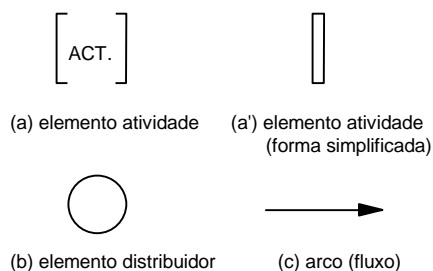


Figura A.7. Elementos do PFS.

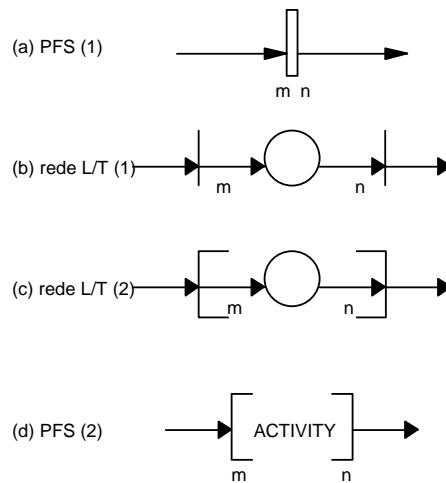


Figura A.8. Elemento atividade em redes L/T..

Similarmente, um elemento-distribuidor pode ser também expandido em um lugar (lugar-distribuidor) com transições à entrada e à saída, como ilustrado na Figura A.9. Ainda, no caso de se expandir dois elementos conectados um ao outro em uma rede L/T, a transição de saída da primeira etapa e a de entrada da etapa seguinte formam uma única transição. Deste ponto em diante, a denominação lugares-etapa é dada tanto para os lugares-atividade como para os lugares-distribuidores.

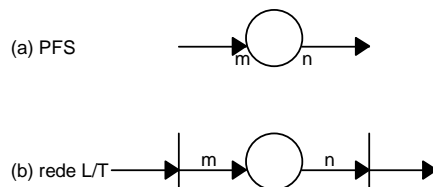


Figura A.9. Elemento distribuidor em redes L/T.

Anexo B

Grafo de Alocação de Recursos (GAR)

Este anexo apresenta uma técnica de modelagem da utilização de recursos de transformação baseada no Grafo de Alocação e Requisição de Recursos (GAR) ou Resource Allocation/Requisition Graph (HASEGAWA, 1996), (SANTOS FILHO 1998).

B.1 Grafos de Alocação e Requisição de Recursos - GAR

Um grafo do tipo GAR é constituído por nós e arcos orientados. Um par contendo um nó e o respectivo arco orientado de saída é denominado par de alocação enquanto um par contendo um nó e o respectivo arco de entrada é denominado par de requisição.

Em um par de alocação o nó representa um determinado recurso $r_q(j)$; o arco orientado de saída possui uma inscrição fixa que representa a etapa do processo $s_q(j)$ que aloca $r_q(j)$ para ser executada.

Por sua vez, em um par de requisição o nó também representa um determinado recurso $r_q(j)$; o arco orientado de entrada possui uma inscrição fixa que representa a etapa do processo $s_q(j-1)$ que requisita $r_q(j)$ para ser utilizado na próxima etapa do processo.

A Figura B.1 ilustra graficamente a representação destes pares para o caso de um mesmo item em uma determinada etapa de sua seqüência de produção.

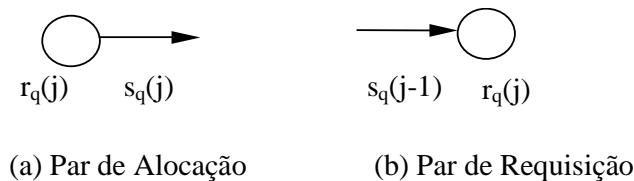


Figura B.1. Pares alocação e requisição de um mesmo produto em uma determinada etapa de sua seqüência de produção

Assim, o GAR é definido como segue:

Definição : Seja $GAR = (R, A)$ um grafo orientado, onde $R = \{R_1, \dots, R_n\}$ é o conjunto de recursos e A é o conjunto de pares ordenados (R_i, R_j) de recursos com $i \neq j$. Considere a matriz $G = (a_{ij})$ dada por :

$$a_{ij} = s_{ij} \text{ se } (R_i, R_j) \in A;$$

$$a_{ij} = 0 \text{ se } (R_i, R_j) \notin A;$$

Onde:

s_{ij} representa a etapa de produção inscrita no arco de R_i para R_j .

A matriz G assim construída é denominada matriz associada ao grafo GAR (HARARI, 1971), (CALLIOLI et al., 1978).

Se os processos produtivos forem modelados a partir de uma seqüência de operações e uma seqüência de recursos utilizados para realizar cada uma das operações correspondentes, é possível obter-se grafo GAR correspondente para cada um destes processos.

Considerando-se o caso genérico de um processo produtivo, o modelo GAR correspondente, ou seja, o modelo de utilização dos recursos referente a este processo é obtido aplicando-se diretamente as definições de pares de alocação e pares de requisição.

Sendo Q o conjunto de n itens diferentes a serem processados em um sistema produtivo, de acordo com a expressão B.1.

$$Q = \{q \in N \mid q \leq n\} \quad (B.1)$$

Onde:

q identifica o produto;

N é o conjunto dos números naturais.

Existe uma seqüência de operações associada a cada item q a qual, por sua vez, agrega uma seqüência de recursos necessários r^*_q . É possível dividir a seqüência de operações em etapas, de maneira que a cada uma destas etapas aloca-se um recurso específico. Como resultado, obtém-se uma seqüência de produção p_q do produto q , de acordo com a expressão (B.2).

$$p_q = \{s_q(0), s_q(1), \dots, s_q(L_q), s_q(L_q + 1)\} \quad (\text{B.2})$$

Onde:

L_q representa o comprimento da seqüência de produção do produto q ;

$s_q(i)$ representa a i -ésima etapa da seqüência de produção do produto q ;

$s_q(0)$ representa a condição inicial para iniciar a seqüência de produção do produto q ;

$s_q(L_q + 1)$ representa a condição correspondente ao estado em que a seqüência de produção do produto q está concluída.

Desta forma define-se a seqüência de recursos r_q^* correspondente à seqüência de produção p_q do produto q , de acordo com a expressão (B.3).

$$r_q^* = \{r_q(1), r_q(2), \dots, r_q(L_q)\} \quad (\text{B.3})$$

Onde:

$r_q(j)$ representa o recurso utilizado na etapa $s_q(i)$ da seqüência de produção do produto q .

A Figura B.2 ilustra o modelo GAR correspondente ao processo produtivo do item q , dadas a sua seqüência de etapas produtivas e sua seqüência de alocação dos recursos pelas etapas.

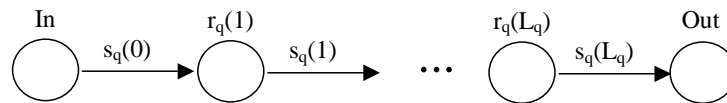


Figura B.2. Exemplo de modelo GAR de um processo produtivo.

Uma vez que o GAR é um grafo transição que representa um autômato finito (REISIG 1985), é possível mapeá-lo em uma rede de Petri (CASSANDRAS 1993).

Definição B.1. Considere um autômato de estados finitos dado pela quintupla $(\mathbf{E}, \mathbf{X}, \mathbf{f}, \mathbf{x}_0, \mathbf{F})$ onde (CASSANDRAS 1993):

\mathbf{E} é um alfabeto finito;

\mathbf{X} é um conjunto de estados finito;

\mathbf{f} é uma função de transição de estados $\mathbf{f}: \mathbf{X} \times \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{X}$

\mathbf{x}_0 é o estado inicial tal que $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{X}$;

\mathbf{F} é um conjunto de estados tal que $\mathbf{F} \subseteq \mathbf{E}$.

Definição B.2. Considere o grafo Mark Flow Graph bipartido, representado por uma sextupla $(\mathbf{B}, \mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{G}_I, \mathbf{G}_E, \mathbf{S})$ onde (MIYAGI 1996):

$\mathbf{B} = \{B_1, \dots, B_i\}$ com $(i \geq 1)$ é um conjunto de boxes;

$\mathbf{T} = \{T_1, \dots, T_j\}$ com $(j \geq 1)$ é um conjunto de transições;

\mathbf{A} é o conjunto de arcos orientados;

$\mathbf{G}_I = \{G_{I1}, \dots, G_{Im}\}$ com $(m \geq 0)$ é um conjunto de portas internas;

$\mathbf{G}_E = \{G_{E1}, \dots, G_{En}\}$ com $(n \geq 0)$ é um conjunto de portas externas;

$\mathbf{S} = \{S_1, \dots, S_p\}$ com $(p \geq 0)$ é um conjunto de arcos de sinais de saída;

De acordo com Cassandras (1993), dado um autômato de estados finitos $(\mathbf{E}, \mathbf{X}, \mathbf{f}, \mathbf{x}_0, \mathbf{F})$, é possível construir-se uma rede de Petri elementar (REISIG 1985) uma vez que se pode associar a cada estado global representado pelo autômato uma determinada marcação

na rede de Petri correspondente. Uma vez que o MFG baseia-se em redes de Petri com a ressalva de ser um grafo interpretado que possui um mapeamento dos sinais externos através de arcos de sinal de saída e portas externas, baseado em Cassandras (1993) é possível inferir que para construir-se um modelo MFG a partir de um GAR implica no seguinte procedimento:

- Cada estado em \mathbf{X} é definido como um box em \mathbf{B} ;
- A cada par de estados $(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$, onde $\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{e})$ para $\mathbf{e} \in \mathbf{E}$, define-se uma transição em \mathbf{T} tal que $\mathbf{T} = \{(\mathbf{x}, \mathbf{x}') : \mathbf{x} \in \mathbf{X}, \mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{e}) \text{ para qq. } \mathbf{e} \in \mathbf{E}\}$
- A seguir, define-se um arco a partir de cada par (\mathbf{x}, \mathbf{t}) e $(\mathbf{t}, \mathbf{x}')$ com $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ e $\mathbf{x}' \in \mathbf{X}$ e $\mathbf{t} \in \mathbf{T}$ tal que $A = \{(\mathbf{x}, \mathbf{t}) : \mathbf{x} \in \mathbf{X}, \mathbf{t} \in \mathbf{T}\} \cup \{(\mathbf{t}, \mathbf{x}') : \mathbf{x}' \in \mathbf{X}, \mathbf{t} \in \mathbf{T}\}$

A partir deste procedimento obtém-se o modelo MFG correspondente ao GAR.

ANEXO C

DESIGNAÇÃO DE VEÍCULOS TRANSPORTADORES

Este anexo apresenta os procedimentos de designação de veículos transportadores (VT) para atender às requisições de transporte em Sistemas Produtivos, baseado em (SANTOS FILHO, 1998).

C.1 Alocação e Distribuição de VT

O procedimento desenvolvido em (SANTOS FILHO, 1998) consiste nas seguintes etapas:

- IX. Definição de um ponto estratégico representativo de toda a demanda de transporte do sistema para ser utilizado como referência no procedimento;
- X. Particionamento do sistema produtivo em regiões de maneira que a cada região aloca-se um VT;
- XI. Determinação de pontos de estacionamento temporário dos VT;

XII. Especificação de algoritmos de controle para a manutenção da distribuição dos VT e alocação dos mesmos de acordo com as demandas de transporte de cada estação de carga/descarga que compõem o sistema produtivo.

Este procedimento considera os seguintes aspectos:

- O sistema de VT deve apresentar um elevado nível de flexibilidade operacional, garantindo um nível de autonomia suficiente para que independa do seqüenciamento fixo das ordens de produção em função do tempo.
- O sistema de VT deve ser capaz de alocar os transportadores automaticamente segundo uma distribuição homogênea em função da demanda das estações de carga/descarga.
- O sistema de VT deve ser capaz de eliminar os congestionamentos de veículos no sistema o que poderia ocasionar filas de espera em pontos de intersecção e comprometimento do atendimento da demanda de transporte do sistema global.
- O sistema de VT deve ser capaz de adaptar-se à ocorrência de eventos imprevistos como falhas nos transportador ou alterações dos níveis de demanda nas estações de carga/descarga.

O procedimento pode ser aplicado também em casos em que os SP são organizados em unidades produtivas, considerando-se os seguintes pontos:

- Os VT devem atender às requisições de transporte dentro e entre as UP, o que não modifica o procedimento.

- Inclusão e exclusão de UP, leva à condição de redefinição das regiões, pois indica uma mudança na distribuição da demanda nos SP.

C.2 Mapeamento dos Pontos Estratégicos

Conforme proposta de Santos Filho (1998), o ponto estratégico representativo de toda a demanda de transporte do sistema, denominado Centróide Virtual de Demanda Global de Transporte (CVDG) é calculado aplicando-se a seguinte expressão (C.1).

$$E_G = O + \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^N D_{mj}} \right) \cdot (P_i - O) \quad (C.1)$$

Onde:

E_G é a posição do CVDG;

N é o n^o de estações de carga/ descarga;

O é a origem do sistema do plano $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$;

E_G é a posição do estacionamento do VT em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$;

D_{mi} é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação E_i ;

P_i é a posição da estação de carga E_i em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ no sistema.

De acordo com a analogia entre o CVDG e o centro de massa (SANTOS FILHO, 1998), o CVDG pode ser considerado um ponto estratégico ótimo, ou seja, de mínima

energia, para o estacionamento de um VT, sendo então utilizado como referência para todo o procedimento.

Quando existem múltiplos VT no SP, torna-se necessário o particionamento do SP em regiões de maneira que a cada região aloca-se um VT. Para se particionar o SP em regiões produtivas, considera-se as requisições através da demanda média regional D_{MR} , calculado pela expressão (C.2), além do trabalho relacionado à atividade de transporte realizada, medida através do Índice de trabalho (ITT), calculado pela expressão (C.3).

$$D_{MR} = \frac{\sum_{j=1}^T D_{m_j}}{T} \quad (C.2)$$

Onde:

T corresponde ao número total de estações destino associadas ao fluxo de materiais computadas nos sistemas.

$$ITT_i = \sum_{j=1}^{M_i} D_{m_j} \cdot d_{ij} \quad (C.3)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, N$; onde N é o n^o de estações de carga/descarga;

ITT_i é o índice de trabalho de transporte na Estação E_i ;

M_i é número de estações destino E_j ;

D_{m_j} é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação E_i ; dos produtos a serem enviados para a estação E_j ;

d_{ij} é a distância entre as estações E_i (origem) e E_j (destino).

- A definição das regiões deve ser tal que garanta uma homogeneidade quanto aos índices de demanda de transporte e de trabalho para atender estas demandas.
- O sistema deve ser reativo, isto é, deve redefinir as regiões a partir do momento em que ocorra uma variação das demandas médias de transporte D_{mi} nas estações de carga/descarga ou então uma variação no número de transportadores capazes de realizarem o transporte de materiais no sistema.
- Cada região deve possuir um ponto de estacionamento estratégico para ser utilizado pelo VT que a esteja assistindo.
- O sistema também deve ser reativo à nível de redefinição da posição estratégica do ponto de estacionamento em uma determinada região, assim que ocorra uma variação das demandas médias de transporte D_{mi} nas estações de carga/descarga do sistema.

Portanto, os passos para definir as regiões produtivas de um sistema, tendo-se já definido o CVDG, são:

- a) Estima-se o volume de trabalho médio de transporte por região (ITT_{MR}) de acordo com a expressão C.4, derivada da expressão C.3.

$$ITT_{MR} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{N_k} D_{mj} \cdot (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \right) \right)}{N} \quad (C.4)$$

Onde:

N é o número de Estações E_i do sistema produtivo;

N_i é número de Estações destino E_j alcançadas a partir de E_i ;

D_{mj} é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação E_i de produtos a serem enviados para a estação E_j ;

$(|x_i - x_j| + |y_i - y_j|)$ é a distância entre as estações E_i (origem) e E_j (destino).

- b) Transladar o sistema de referência $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ para o sistema $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$, de acordo com a expressão (C.5).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{CG} \\ y_{CG} \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

Onde:

$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ são as coordenadas do ponto em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$;

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ é a matriz de mudança da base $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ para base $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$

com determinante não nulo;

$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$ são as coordenadas do ponto em $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$;

$\begin{bmatrix} x_{CG} \\ y_{CG} \end{bmatrix}$ são as coordenadas do ponto do CVDG em $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$;

- c) Converter o sistema de coordenadas cartesianas $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ para coordenadas polares de acordo com a expressão (C.6).

$$\left. \begin{aligned} x' &= \rho \cdot \cos \theta \\ y' &= \rho \cdot \sin \theta \\ \operatorname{tg} \theta &= y' / x' \end{aligned} \right\} \quad (\text{C.6})$$

- d) Variando-se θ , inicia-se a partição do sistema em regiões produtivas: as estações cobertas pela varredura de θ são inclusas na região, somando o seu ITT ao ITT da região; quando o ITT da região atingir o ITT_{MR} , inicia-se nova região.
- e) Para cada uma das regiões definidas no passo anterior calcula-se o ponto estratégico para o estacionamento de um VT. Para isto, aplica-se a expressão (C.7).

$$E_{G_k} = O' + \sum_{i=1}^{N_k} \left(\frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^{N_k} D_{mj}} \right) \cdot (P_i - O') \quad (\text{C.7})$$

Onde:

N_k é o número de estações de carga/descarga na região k ;

O' é a origem do sistema do plano $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$;

E_{Gk} é a posição do estacionamento do VT em $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ na região k ;

D_{mj} é a taxa de demanda média de transporte por unidade de tempo na estação E_j ;

P_j é a posição da estação de carga E_j em $(O', \vec{e}'_1, \vec{e}'_2)$ no sistema.

Aplicando estes passos, obtém-se um particionamento do SP em regiões e em cada região é definido um ponto estratégico para estacionamento de VT que passa a ser denominado centróide virtual de demanda regional (CVDR).

É importante observar que tanto as regiões como os pontos estratégicos devem ser atualizados com uma frequência que depende da dinâmica do SP. A atualização é necessária não somente quando há falhas em algum dispositivo do sistema, mas sempre que for alterado o programa de produção, ou as condições dos recursos, seja pela ocorrência de falhas ou não, é necessário redefinir os pontos estratégicos de estacionamento do sistema de transporte. Supondo por exemplo um SP de elevada flexibilidade operacional que comporta a manufatura simultânea de um conjunto de vários produtos de lotes variáveis, à medida em que os lotes são finalizados, deve-se atualizar o posicionamento dos pontos estratégicos. Numa abordagem antropocêntrica de controle, o elemento humano poderá intervir na dinâmica do sistema disparando a reatividade do mesmo, isto é, ele avaliará o momento adequado para reorganizar as regiões produtivas e seus pontos estratégicos de estacionamento.

Definidas as regiões e os pontos estratégicos de estacionamento dos VT, a próxima etapa do procedimento consiste na especificação de um algoritmo de controle capaz de gerenciar efetivamente a alocação de VT para a realização dos trabalhos de transporte.

C.3 Algoritmo de Controle para Movimentação dos VT

Se for mantida uma estratégia de controle baseada na premissa da homogeneidade quanto aos índices de trabalho de transporte de cada região produtiva, a cada região ter-se-á um determinado VT alocado para realizar a mesma quantidade de trabalho dos VT alocados nas demais regiões. Desta forma, a disponibilidade de cada VT para atender as demandas de transporte em sua respectiva região será a mesma para todos os VT, evitando problemas de desequilíbrio quanto ao volume de trabalho associado a cada transportador⁵.

O diagrama Nassi-Schneidermann da Figura C.1 apresenta o algoritmo de controle para movimentação dos VT. Observa-se que o controle age de tal forma que atribui prioridade para atender as requisições de transporte nas regiões em que existe VT disponível. Desta forma, minimiza-se a possibilidade de ocorrerem perturbações, uma vez que a premissa básica para manter o equilíbrio dinâmico do sistema consiste em controlar a homogeneidade dos trabalhos de transporte dos VT em cada região, evitando fluxos desnecessários de VT em vazio entre regiões. Em cada região é atendida sempre a requisição mais prioritária, de acordo com as demandas de transporte de cada uma das estações para evitar gargalos dentro da própria região. As regiões que requisitam transporte e não possuem VT são atendidas posteriormente já que envolvem o fluxo de VT entre regiões. Para isso, considera-se o problema de alocar os N_{VT} VT disponíveis às

⁵ Um desequilíbrio desta natureza poderia refletir em atrasos cada vez maiores para atender-se as demandas de transporte do sistema global e percursos maiores, prejudicando-se ainda mais a eficiência do sistema para o caso dos VT que trafegarem em vazio.

requisições de transporte como sendo um problema de designação, que pode possuir uma solução ótima (NOVAES, 1978); (BRONSON, 1985); (PUCCINI &PIZZOLATO, 1987).

Desta forma, miniza-se o percurso em vazio dos VT.

Para manter-se o volume de trabalho dos VT uniforme, isto é, manter a alocação de um VT para cada região, aplica-se o algoritmo da Figura C.2. Este algoritmo assume que os VT ociosos de uma região que já tem um VT alocado devem ser alocados para regiões com ausência de VT. Este controle é executado após realizar-se o controle local descrito no algoritmo da Figura C.1.

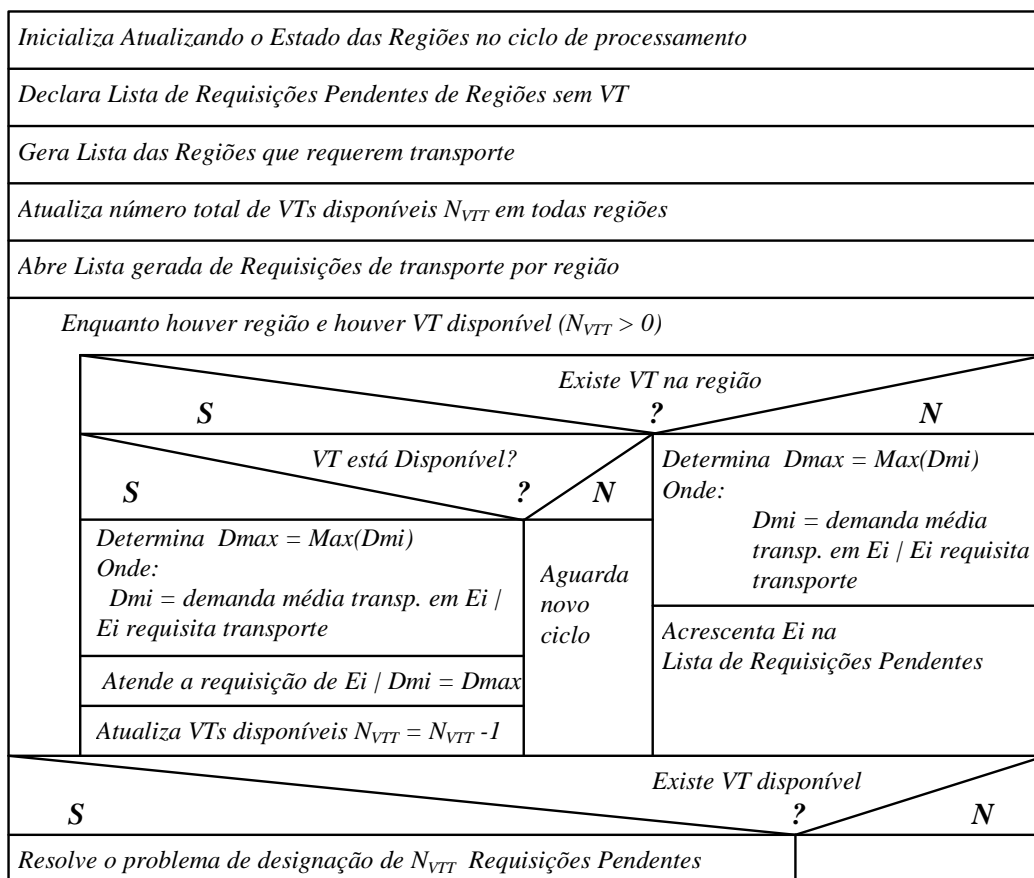


Figura C.1. Algoritmo de controle para alocar os VT de acordo com as demandas de transporte.

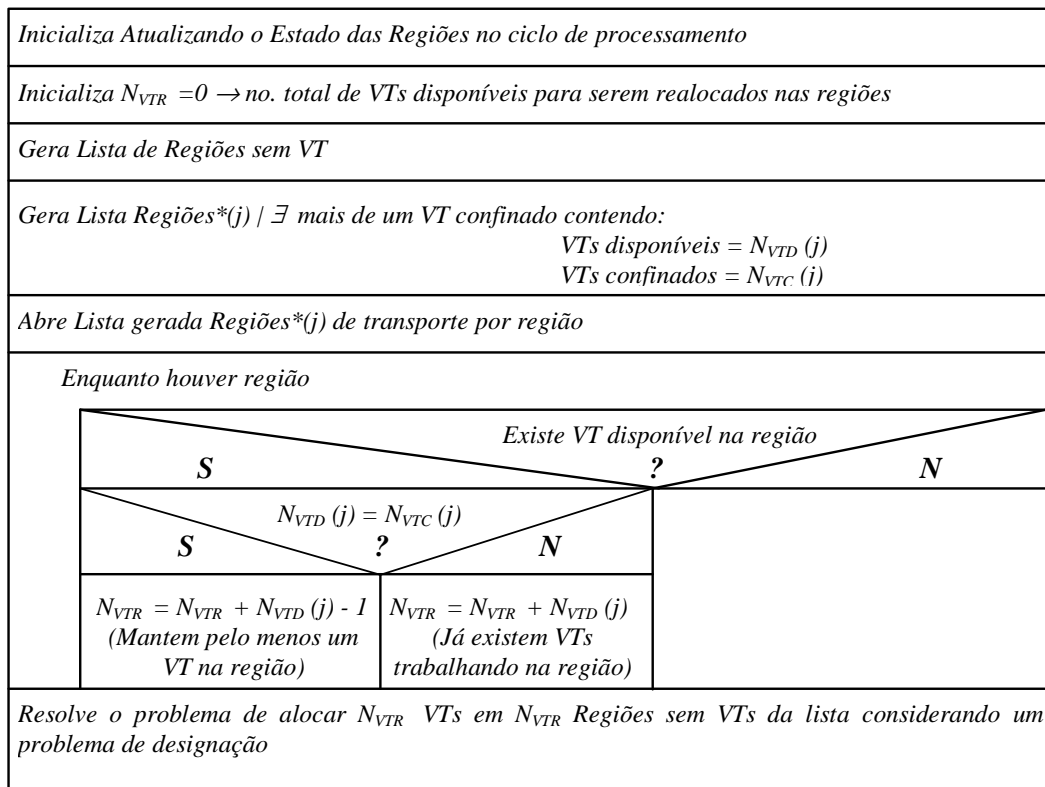


Figura C.2. Algoritmo de controle para manter o volume de trabalho dos VT uniforme.

O problema de se alocar os VT remanescentes às requisições de regiões sem VT pode ser estruturada na seguinte situação: existem y VT e y trabalhos de transporte; são conhecidos os custos C_{ij} correspondentes a todas as combinações de VT e trabalhos de transporte; assim, objetiva-se atribuir os trabalhos a esses VT, de modo que o custo total seja mínimo. Esta estruturação correspondente à formulação clássica do problema de designação ou atribuição (NOVAES, 1978); (BRONSON, 1985); (PUCCINI &PIZZOLATO, 1987).

A solução do problema consiste em estabelecer a matriz de custos (C_{ij}) onde, $(i$ identifica o VT e j a estação requisitante) de acordo com a expressão (C.8).

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Estações Requisitando transporte} \\ E_1 & E_2 & E_3 & E_4 & \dots & E_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & \dots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & \dots & C_{2N} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & \dots & C_{3N} \\ \vdots & & & & & \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{N3} & C_{N4} & \dots & C_{NN} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{VTs} \\ VT_1 \\ VT_2 \\ VT_3 \\ \vdots \\ VT_N \end{matrix} \end{matrix} \quad (\text{C.8})$$

O custo C_{ij} pode ser estimado objetivamente a partir da expressão (C.9).

$$C_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (\text{C.9})$$

Onde:

$$|x_i - x_j| + |y_i - y_j| \text{ é a distância retangular entre os pontos } P_i(x_i, y_i) \text{ e } P_j(x_j, y_j).$$

Por definição, o número de VT e o número de regiões requisitando o transporte deve ser o mesmo para que este problema possa ser tratado como um problema de designação. Em situações onde esta condição não se verifica, a solução consiste em criar-se transportadores fictícios ou estações fictícias, respectivamente, até que a condição de igualdade seja satisfeita. A estes VT ou estações fictícias associa-se custos elevados (da ordem de 10^{10} , por exemplo) de maneira que não comprometam a solução do problema. Para se obter a designação de custo mínimo a partir da matriz de custos, pode-se aplicar o Método Húngaro (BRONSON, 1985).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, T. C., PERKUSICH, A., FIGUEIREDO, J. C. A. A Fault Tolerant Coloured Petri Net Model For Flexible Manufacturing Systems. Journal of the Brazilian Computer Society. SBC, v.4, n.2, p.16 - 30, 1997.

BAR-YAM, Y. "Dynamics of complex systems". Addison-Wesley. 1997.

BANASZAK, Z. A.; KROGH, B. H. Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows. IEEE Transactions on Robotics and Automation. vol. 6, no. 6, pp. 724--734, Jun. 1990.

BEACH, R.; MUHLEMANN, A.P.; PRICE, D.H.R.; PATERSON, A.; SHARP, J.A. A review of manufacturing flexibility. European Journal of Operational Research. 122,41-57. 2000.

BONGAERTS, L.; MONOSTORI, L.; MCFARLANE, D.; KÁDÁR, B. Hierarchy in distributed shop floor control. Computers in Industry. vol.43, p.123-137. 2000.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. The unified modeling language user guide. Addison-Wesley, 1999.

BRENNAN, R.W. Performance comparison and analysis of reactive and planning -based control architectures for manufacturing. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 16, 191-200. 2000.

- BROWNE, J.; DUBOIS, D.; RATHMILL, K.; SETHI, S.P.; STECKE, K.E. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*. 2(2), 114-117, 1984.
- CALLIOLI, C.A. et al. *Álgebra Linear e Aplicações*. Atual Editora, 2.ed. São Paulo, 1978.
- CAO, X. A comparison of the dynamics of continuous and discrete event systems. *Proc. of the IEEE*. v.77, p.7-13, 1989.
- CASSANDRAS, C.G. *Discrete event systems: Modeling and performance Analysis*. Irwin & Aksen. 1993.
- CHING-YUEN, C.; REDFORD, A.; FAT-WING, L. Cell control architecture for manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 66, p.137-145, 1997.
- DILTS, D. M.; et al. The evolution of control architecture of automated manufacturing systems; *Journal of Manufacturing Systems*, n.10, p.79-93, 1991.
- ECKEL, B. *Thinking in C++*, 2nd ed., Vol 1, Ed. Prentice Hall, 2000.
- EDMONDS, B. What is Complexity? - The philosophy of complexity per se with application to some examples in evolution. In F. Heylighen & D. Aerts (eds.): *The Evolution of Complexity*, Kluwer, Dordrecht, 1999.
- FANTI, M.P.; MAIONE, B.; MASCOLO, S.; TURCHIANO, B. "Event-Bases Feedback Control for Deadlock Avoidance in Flexible Production Systems", in *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 13, no.3, pp.347-363, 1997.
- FLETCHER, M., BRUSEY, J., The Story of the Holonic Packing Cell, *Proceedings of Conference AAMAS'03*, 2003.

FUJI ELETRIC & FUJI-FACOM Control. Material Flow System Control (ϕ -net). Journal of the Society of Instrument and Control Engineer. V.28, n.9, p.826-827. Tokyo, Japan, 1989.

GAITHER, N., FRAIZER, G., Administração da Produção e Operações, Ed. Pioneira, 2001.

GEORGEFF, M. D. Technical Overview, 1996. Disponível em:

http://www.aaii.oz.au/proj/dmars_tech_overview/dMARS-1.html. Acesso em: 20 set. 2001.

GOMES, L.F.S. Redes de Petri Reactivas e Hierárquicas - Integração de Formalismos no Projeto de Sistemas Reactivos de Tempo-Real. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal 1997.

GROOVER, M. P. Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing, Second edition, Prentice-Hall, 2000.

HARARI, F. Graph Theory. Addison-Wesley Publishing Company, 2. ed. Philippines, 1971.

HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K. MFG Representation for Functional Modules of Discrete Production System, Proceedings of XI SICE System Symposium, p. 273-278, Japão, 1985.

HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K. Programmable Controller Based on MFG. Proceedings of SICE'82, p. 109-110. Tokyo, 1982 (em japonês).

- HASEGAWA, K. Modeling, control and deadlock avoidance of flexible manufacturing systems. In: 11° CBA - CONGRESSO BRASILEIRO de AUTOMÁTICA, Anais. SBA, São Paulo, SP, v.I, p.37-51, 09/1996.
- HASEGAWA, K., TAKAHASHI, K. e MIYAGI, P.E. Application of the Mark Flow Graph to Represent Discrete Event Production Systems and System Control, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.24, no 1, p. 69-75, 1988.
- HASEGAWA, K.; TAKAHASHI, K.; MASUDA, R.; TANGE, K.; SUZUKI, T. Simulation of Discrete Production System Based on MFG, System Science, vol 13 no1-2. Poland, 1987.
- HASEGAWA, KENSUKE; SUGISAWA, MARIKO; MA, LIQUN, Deadlock avoidance policy based on Request/Allocation Graph [1], proceedings of Joint Symposium on System and Information, Sice, Matsuyama, Japan, p213-218. 1996.(em japonês)
- HIGGINS, P. G. Review of Anthropocentric Production Systems - the European Response to Advanced Manufacturing and Globalization by Franz Lehner. International Journal of Human Factors in Manufacturing, 5(1), 1995.
- HITOMI, K. Manufacturing Systems Engineering. Taylor and Francis Ltd. 1990.
- HO, Y.C. Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems. Proc. of IEEE, v.77, p.3-6, 1989.

IEC61499-Parte1, Function blocks for industrial-process measurement and control systems - Part 1: Architecture, Final Draft International Standard, International Electrotechnical Commission (IEC), 2000.

INAMASU, R. Y. Modelo de FMS: uma plataforma para simulação de planejamento. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

ISA S95-Parte 1, ANS/ISA-dS95.00.01, Enterprise-Control System Integration – Part 1: Enterprise - Control System Integration, Draft Standard 14, The Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA), RTP North Carolina, USA, Nov. 1999.

ITO, Y. A desirable production structure looking toward the 21st century - Anthropocentric Intelligence-Based Manufacturing. In: XI COBEM. Anais. Brazil, S. Paulo, p.23-32, 1991.

JARVIS, J., JARVIS, D. and McFARLANE D., Achieving holonic control—an incremental approach, Computers in Industry, Volume 51, Issue 2, Pages 211-223, Jun. 2003.

KOLLINGBAUM, M., HEIKKILAE, T., PEETERS, P., MATSON, J., VALCKENAERS, P., MCFARLANE, D., BLUEMINK, G. Emergent Flow Shop Control Based On Mascada Agents, In Proceedings of MIM. 2000.

WOOLDRIDGE, M. & JENNINGS, N.R. “Intelligent Agents”, Berlin: Springer-Verlag, 1-22, 1995.

- JONES, A., SALEH,A., A multi-level/multi-layer architecture for intelligent shopfloor control. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1990, vol3, no1, pp60-70.
- JUNQUEIRA, F. Modelagem de Sistemas Flexíveis de Movimentação de Materiais através de redes de Petri interpretadas. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP, 2001.
- KOVÁCS, I. Sistemas Antropocêntricos de Produção. *Socius Working Paper n6/93*, 1993.
- KOVÁCS, I.; MONIZ, A. B. Issues on the anthropocentric production systems. In: *Internacional Conference on Architectures and Design Methods for Balanced Automation Systems, Proceedings*. Ed. by CAMARINHA-MATOS, L.M.; AFSARMANESH, H. *Balanced Automation Systems Architectures and Design Methods*, Chapman & Hall, p.131-40, 1995.
- KÜNZLE, L. A. Controle de Sistemas Flexíveis de Manufatura - Especificação dos níveis equipamento e estação de trabalho, Dissertação de Mestrado, CEFET/PR, 1990.
- LEWIS, R.W. *Programming industrial control systems using IEC 1131-3 (Revised Edition)*. The Institution of Electrical Engineer. London, United Kingdom, 1998.
- LIU, X., ZHANG,W.J., Issues on the architecture of an integrated general-purpose ShopFloor Control software system. *Journal of Materials Processing Technology*, 76, pp261-269, 1998.

- MATSUSAKI, C.T.M., Redes F-MFG e sua Aplicação no projeto de sistemas antropocêntricos. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- MASIP, R.F., "La Fábrica Flexible". Ed. Marcombo, 1988.
- MIYAGI, M.; KISIL, M.; SANTOS Fº, D.J.; MARUYAMA, N.; MIYAGI, P.E. Modelagem de Serviço de Saúde Utilizando Rede de Petri. In 4o. SBAI - SIMPÓSIO BRASILEIRO de AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, Anais., SBA, São Paulo, SP, 04/2000.
- MIYAGI, P.E. Control System Design, Programming and Implementation for Discrete Event Production Systems by using Mark Flow Graph. Tese de Doutorado - Tokyo Institute of Technology. Japan, 1988.
- MIYAGI, P.E. Controle Programável - Fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos. S. Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda., 1996.
- MOREIRA, D.A., Administração da Produção, Thomson Learning, 2002.
- NAKAMOTO, F. Y. Sistematização do projeto do controle de sistemas produtos. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- NOVAES, A.G. Métodos de otimização. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1978.
- PARK, J., REVELIOTIS, S. A., BODNER, D. A. e MCGINNIS, L. A distributed event-driven control architecture for flexibly automated manufacturing systems.

- International Journal Computer Integrated Manufacturing. Vol15, n2, 109-126. 2002.
- PARUNAK, H.V.D. et al., The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design, Workshop on Agent-Based Manufacturing, ICAA'98, Minneapolis, MN, 10 May 1998.
- PARUNAK, H.V.D., Practical and Industrial Applications of Agent-Based Systems, technical report, Industrial Technology Institute, 1998.
- PARUNAK, H.V.D., Industrial and Practical Applications of DAI, in "Multiagent Systems – A modern Approach to distributed artificial intelligence", Edited by Weiss,G., The MIT Press, England, 2000.
- PELS, H.J., WORTMANN, J.C. e ZWEGERS, A.J.R. Flexibility in manufacturing: An architectural point of view. Computers in Industry 33, 271-283. 1997.
- PETERSON, J.L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.J, 1981.
- PRESSMAN, R.S. Software engineering, ed.5. McGraw-Hill. Boston, 2000.
- PUCCINI, A.L.; PIZZOLATO, N.D. Programação Linear. Livros Téc. Cient. Ed. S.A. São Paulo, 1987.
- REISIG, W. A Primer in Petri Nets Desing. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 1992.
- REISIG, W. Petri Nets: An Introduction, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 1985.

- SANTOS FILHO, D.J. Aspectos de Projeto do Controle de Sistemas Produtivos.. Tese Livre de Docência - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- SANTOS FILHO, D.J. Controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção Baseado em Redes de Petri Interpretadas. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- SANTOS FILHO, D.J. Proposta do Mark Flow Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo , 1993.
- SANTOS FILHO, D.J.; MIYAGI, P.E. Enhanced Mark Flow Graph to Control Flexible Manufacturing Systems. Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences, ABCM, Rio de Janeiro, RJ, v.17, n.2, p.232-248, 1995.
- SHEN, W. and NORRIE, D.H. Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey. Knowledge and Information Systems, an International Journal, 1(2), 129-156, 1999.
- UPTON, D. The management of manufacturing flexibility. California Management Review, Winter, pp. 72-89, 1994.
- VAN BRUSSEL, H., WYNS, J., VALCKENAERS, P., BONGAERTS, L., PEETERS, P. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. Computers in Industry 37, 255-274. 1998

- VISWANADHAM, N. NARAHARI, Y. e JOHNSON, T. L. Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems using Petri net models. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 6:713—722. 1990.
- WEISS, G., “Multiagent Systems – A modern Approach to distributed artificial intelligence”, The MIT Press, England, 2000.
- YOSHIDA, S. Tagged MFG Based Control of Materials Flow in Jib-Shop Production System. Dissertação de Mestrado. Tokyo Institute of Technology. Japan, 1988. (em japonês)
- ZHOU, M.; DICESARE, F. Parallel and sequential mutual exclusion for Petri net modeling of manufacturing systems with shared resources. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 515-527, 1991.
- ZHOU, M., DICESARE, F., Petri Net Synthesis for discrete event control of manufacturing systems, Kluwer Academic Publishers, 1993.